

分类号: F49; F124.3; X321

单位代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2221010101

题 目 数字经济赋能绿色低碳发展
的效应与机制研究

英文并列

题 目 Research on the Effects and Mechanisms
of the Digital Economy Empowering
Green and Low-Carbon Development

学生姓名: 段 影

指导教师: 潘海峰 副教授

专 业: 金 融

研究方向: 数字经济

论文答辩日期: 2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：段影

日期：2025 年 5 月 14 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名： 殷影

指导教师签名： 潘海峰

日期：2025 年 5 月 14 日

日期：2025 年 5 月 14 日

数字经济赋能绿色低碳发展的效应与机制研究

摘 要

随着全球气候变化问题的日益严峻以及可持续发展的需求不断增长,绿色低碳发展已成为全球经济转型的重要战略目标之一。传统的经济发展模式在追求高增长的同时,往往伴随着资源的过度消耗和环境的污染,因此,推动绿色低碳发展成为各国面临的紧迫任务。数字经济作为一种新的经济形态和发展方式,凭借信息技术的广泛应用和创新,为推动绿色低碳发展提供了新的动力与解决方案。发展新质生产力是中国经济实现绿色发展的核心需求和关键驱动力,从新质生产力视角研究数字经济影响绿色低碳发展的内在逻辑,不仅能够拓展数字经济研究的深度与广度,而且对于应对气候变化,推进绿色低碳发展具有重要现实意义。

本文首先探讨了数字经济、绿色低碳发展的概念,从新质生产力视角分析数字经济影响绿色低碳发展的机理,然后基于 2012-2023 年中国 276 个城市的面板数据,构建特征词图谱,结合 Python 软件,测度了城市数字经济发展水平,运用固定效应、中介效应、门槛效应模型,从减污降碳的视角,实证检验了数字经济对绿色低碳发展的影响效应,并进行稳健性检验、机制效应检验、异质性分析和门槛效应检验。进一步,基于 2012-2023 年中国 31 个省份的面板数据,运用熵值法测度数字经济发展水平,采用空间杜宾模型实证分析数字经济影响绿色低碳发展的直接效应和间接效应,运用中介效应模型分析数

字经济对绿色低碳发展的影响机制。

研究发现：数字经济具有显著的减污降碳效应，能够显著促进绿色低碳发展，并且该结论经过一系列稳健性检验依然成立；数字经济可以通过提高城市绿化水平进而降低城市碳排放和污染排放，促进城市绿色低碳发展；技术进步水平在数字经济的减污降碳过程中发挥了遮掩效应，且具有门槛效应，当技术进步水平较低时，数字经济与碳排放和污染排放正相关；当技术进步水平较高时，数字经济对碳排放和污染排放存在显著的抑制作用。空间溢出视角下分析表明：各省份碳排放和污染排放水平存在明显的空间相关性；数字经济对本地区碳排放和污染排放具有显著的抑制作用，能够显著促进本地区绿色低碳发展，同时对周边地区也存在一定的空间溢出效应；绿色技术创新水平和产业集聚水平在数字经济减污降碳过程中起到了中介作用。

关键词：数字经济，绿色低碳发展，减污降碳，中介效应，空间效应

RESEARCH ON THE EFFECTS AND MECHANISMS OF THE DIGITAL ECONOMY EMPOWERING GREEN AND LOW-CARBON DEVELOPMENT

ABSTRACT

With the increasing severity of global climate change issues and the growing demand for sustainable development, green and low-carbon development has become one of the important strategic goals for the global economic transformation. The traditional economic development model, while pursuing high growth, is often accompanied by excessive consumption of resources and environmental pollution. Therefore, promoting green and low-carbon development has become an urgent task for all countries. As a new economic form and development mode, the digital economy, relying on the extensive application and innovation of information technology, provides new impetus and solutions for promoting green and low-carbon development. Developing new quality productive forces is the core requirement and key driving force for China's economy to achieve green development. Studying the internal logic of how the digital economy affects green and low-carbon development from the perspective of new quality productive forces can not only expand the depth and breadth of digital economy research, but

also has important practical significance for addressing climate change and promoting green and low-carbon development.

This paper first explores the concepts of the digital economy and green and low-carbon development, and analyzes the mechanism by which the digital economy affects green and low-carbon development from the perspective of new quality productive forces. Then, based on the panel data of 276 cities in China from 2012 to 2023, it constructs a characteristic word map. Combined with Python software, it measures the development level of the urban digital economy. Using fixed effect, mediating effect, and threshold effect models, from the perspective of pollution reduction and carbon emission reduction, it empirically tests the impact of the digital economy on green and low-carbon development, and conducts robustness tests, mechanism effect tests, heterogeneity analysis, and threshold effect tests. Furthermore, based on the panel data of 31 provinces in China from 2012 to 2023, it measures the development level of the digital economy using the entropy method, and uses the spatial Durbin model to empirically analyze the direct and indirect effects of the digital economy on green and low-carbon development. It also uses the mediating effect model to analyze the influence mechanism of the digital economy on green and low-carbon development.

The research findings are as follows: The digital economy has a significant effect of reducing pollution and carbon emissions, and can

significantly promote green and low-carbon development, and this conclusion still holds after a series of robustness tests. The digital economy can promote urban green and low-carbon development by improving the urban greening level, thereby reducing urban carbon emissions and pollution emissions. The level of technological progress plays a masking effect in the process of pollution and carbon emission reduction by the digital economy, and there is a threshold effect. When the level of technological progress is low, the digital economy is positively correlated with carbon emissions and pollution emissions. When the level of technological progress is high, the digital economy has a significant inhibitory effect on carbon emissions and pollution emissions. Analysis from the perspective of spatial spillover shows that there is an obvious spatial correlation in the levels of carbon emissions and pollution emissions among provinces. The digital economy has a significant inhibitory effect on carbon emissions and pollution emissions in the local area, and can significantly promote local green and low-carbon development. At the same time, it also has a certain spatial spillover effect on surrounding areas. The levels of green technology innovation and industrial agglomeration play a mediating role in the process of pollution and carbon emission reduction by the digital economy.

KEY WORDS: Digital Economy, Green and Low-carbon Development, Pollution Reduction and Carbon Emission Reduction, Mediating Effect, Spatial Effect

目录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第 1 章 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 研究内容与研究方法	4
1.2.1 研究内容	4
1.2.2 研究方法	5
1.2.3 研究框架	6
1.3 创新点与不足之处	7
1.3.1 创新点	7
1.3.2 不足之处	7
第 2 章 理论基础与研究综述	9
2.1 理论基础	9
2.1.1 低碳经济学理论	9
2.1.2 绿色发展理论	9
2.2 研究综述	10
2.2.1 数字经济研究	10
2.2.2 绿色低碳发展研究	12
2.2.3 数字经济影响绿色低碳发展研究	15
2.2.4 文献述评	16
第 3 章 数字经济对绿色低碳发展的影响及机制分析	17
3.1 数字经济的减污降碳效应	17
3.2 数字经济赋能绿色低碳发展的作用机制	18
3.3 技术进步的门槛效应	20
3.4 本章小结	21
第 4 章 数字经济赋能绿色低碳发展的实证研究	23

4.1 变量测度与选取说明	23
4.1.1 被解释变量	23
4.1.2 核心解释变量	23
4.1.3 控制变量	24
4.1.4 中介变量	25
4.2 模型构建	25
4.3 数据说明与描述性统计	26
4.4 基准回归结果分析	27
4.5 稳健性检验	28
4.6 机制效应检验	30
4.7 进一步分析	33
4.7.1 区域异质性	33
4.7.2 城市类型异质性	34
4.7.3 门槛效应检验	35
4.8 本章小结	36
第 5 章 数字经济赋能绿色低碳发展的空间效应分析	38
5.1 变量选取与数据说明	38
5.1.1 被解释变量	38
5.1.2 核心解释变量	38
5.1.3 中介变量	40
5.1.4 控制变量	40
5.2 空间计量模型	40
5.2.1 模型设定	40
5.2.2 空间权重矩阵	41
5.2.3 空间自相关性检验	41
5.3 基准回归与空间计量模型的选择	42
5.4 数字经济对绿色低碳发展影响的实证分析	44
5.4.1 空间计量模型回归结果分析	44
5.4.2 空间溢出效应分解	45

5.5 稳健性检验	47
5.6 机制效应检验	49
5.7 本章小结	51
第 6 章 结论与政策建议	53
6.1 结论	53
6.2 政策建议	54
参考文献	56
攻读学位期间发表的学术论文目录	64
致 谢	65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与研究意义

1.1.1 研究背景

随着全球工业化和城市化进程的加速，人类活动产生的温室气体排放量不断增加，尤其是二氧化碳，导致全球气候变暖问题日益严峻。气候变化带来一系列的负面影响，对人类的生存和发展构成了严重威胁。从能源领域来看，全球能源消费结构仍然以煤炭、石油、天然气等化石能源为主，这些能源的燃烧是碳排放的主要来源。尽管可再生能源的发展取得了一定进展，但在能源供应体系中的占比仍有待提高，且存在能源利用效率低下、能源浪费等问题，传统制造业的高耗能、高排放生产方式尚未得到根本转变。与碳排放相伴而生的是各类污染排放问题，包括大气污染、水污染、土壤污染等，这些污染排放对生态环境和人类健康造成了严重损害。工业废气和燃煤烟尘等导致空气质量下降，雾霾天气频繁出现，严重影响人们的呼吸健康；工业废水和生活污水的排放造成水体污染，影响水资源的可持续利用和水生生态系统的平衡；工业固体废物的不当处置等导致土壤污染，影响土壤肥力和农作物质量安全。

继农业时代、工业时代之后，新一轮信息化时代正加速发展。在这一全球化、信息化的时代，数字经济作为其中经济发展的重要组成部分，是一种新的经济形态和发展方式，与信息技术的发展紧密相连。我国数字经济影响程度之深、发展之快、辐射范围之广，正推动生产方式、生产技术和生活方式深刻变革。当前，关于数字经济的内涵并没有一个明显的界定，狭义的理解是将原有产业数字化，即从原先的国民经济活动的部门中把货物服务以及生产、消费和分配等传统业务活动抽离，将这些传统业务活动发展成独立的国民经济核心产业，也就是所谓的数字化产业；广义的理解则并不将数字经济再局限于产业，而是把它看作一类经济活动，把数字化后的知识与信息当作是生产要素，借助现代信息技术如互联网、移动通讯等，以此提升经济活动效率并以此优化宏观经济结构的总和（许宪春和张美慧，2020）^[1]。2024 年 3 月 30 日，国家数据局正式发布《数字中国发展报告（2023 年）》，据报告显示，我国数字经济规模于 2023 年接近 53.9 万亿元，

总量位居世界第二，相较于 2022 年的 41.5%，其占 GDP 的比重提高至 42.8%。数字经济在稳增长促转型中起到重要的引擎作用，在推动绿色低碳发展进程中的作用亦不容忽视。

党的二十大报告提出，要“协同推进降碳、减污、扩绿、增长，积极应对气候变化，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。2024 年 7 月，习近平总书记在党的二十届三中全会第二次全体会议上指出，“因地制宜发展新质生产力，加快培育外贸新动能，扎实推进绿色低碳发展”。在“碳达峰”和“碳中和”的双重目标约束下，协同推进减污降碳是中国推动绿色低碳发展的关键举措，发展新质生产力是我国实现绿色低碳转型，保障能源安全的关键路径。当前在国家大力发展数字经济的背景下，其已经融入经济活动的各个环节，而新质生产力是绿色低碳发展新动能的培育者，开辟了新的领域和赛道，成为促进经济向绿色低碳转型的核心驱动力。在实现减污降碳的目标过程中，面临着诸多技术、经济和社会方面的挑战，迫切需要借助数字经济的创新力量，挖掘节能减排潜力，推动各领域的低碳转型。环境问题不仅引发了公众对环境保护的高度关注和强烈诉求，也对经济的可持续发展形成了制约，促使各国政府和企业加大对污染治理的投入和力度，寻求更加有效的污染减排解决方案，而数字经济的快速发展为精准治污、科学发展提供了新的思路和手段。因此，系统性地评估数字经济在城市减污降碳中的影响及其作用机理，不仅能够拓展数字经济研究的深度与广度，而且对于应对气候变化，推进绿色低碳发展具有重要现实意义，同时，分别从地级市和省级层面展开研究，可以更加全面且深入地理解数字经济赋能绿色低碳发展的作用机制。

1.1.2 研究意义

本文将数字经济作为赋能绿色低碳发展的重要手段，将碳排放和污染排放纳入同一分析框架，运用 Python 软件，对城市政府工作报告进行分词处理，测度数字经济发展水平，通过建立相关指标和模型来分析数字经济对绿色低碳发展的影响，并基于新质生产力视角，研究技术进步水平和城市绿化水平对绿色低碳发展的中介效应。进一步，从空间视角下，研究数字经济赋能绿色低碳发展的空间溢出效应，并明确作用机制，具有一定的理论意义和实践意义。

（1）理论意义

第一，厘清了数字经济对碳排放和污染排放的影响机制，丰富了两者之间的理论关系。本文基于文献梳理与机理分析，系统阐述了数字经济作用于碳排放和污染排放的内在逻辑。归纳了数字经济如何通过加强技术创新能力和城市绿化水平影响碳排放和污染排放；并运用中介效应模型验证其作用机理，为数字经济与环境治理之间的关系提供了实证支持，也为后续的政策制定和实践应用提供了一定的参考依据。

第二，数字经济赋能绿色低碳发展的研究有助于推动传统环境经济学理论的创新和拓展。本研究为理解经济增长与环境保护之间的关系提供一个新的视角，特别是在数据作为关键生产要素的角色下，厘清数字化转型如何推进环境效益具有重要研究价值。相关研究明确了数字经济在实现“双碳”目标中的功能定位，有助于丰富数字经济基础理论的内涵与应用场景，为推动绿色高质量发展提供新的理论支撑。

第三，深化可持续发展理论。可持续发展理论强调经济、社会和环境的协调共进。数字经济作为一种新的经济形态，为可持续发展的理论深化提供了技术和实践支撑。数字经济通过提高资源利用效率、优化能源管理等方式，更加精准地衡量和实现经济活动中的环境效益，使得可持续发展理论在微观层面的实践路径更加清晰，从宏观理念向微观操作和中观产业协调等多个维度深化，进一步完善了可持续发展理论体系，为实现城市可持续发展提供了新的理论依据。

（2）实践意义

第一，应对气候变化挑战。全球气候变暖是当今世界面临的最严峻的环境挑战之一。数字经济的赋能可以为应对气候变化提供有效的解决方案。一方面，数字技术能够帮助监测和评估温室气体排放。另一方面，数字经济可以推动能源领域的低碳转型。数字经济的应用能够优化电力分配，提高可再生能源（如太阳能、风能）的接入和消纳能力，减少对传统化石能源的依赖，从而有效降低碳排放和污染排放，为全球应对气候变化做出积极贡献。

第二，推动经济高质量发展。当前，我国经济发展正处于从高速增长向高质量发展的转型阶段。数字经济赋能绿色低碳发展是实现这一转型的重要途径。从微观企业层面来看，采用数字技术实现绿色生产，可以降低企业的生产成本，提高产品质量和附加值。从宏观经济层面看，绿色低碳产业的发展在数字经济的推

动下能够形成新的经济增长点，带动相关产业的协同发展，如节能环保产业、新能源汽车产业等，促进经济结构的优化升级，增强经济的韧性和可持续性。

第三，推动全球环境治理合作。在全球层面，数字经济为各国在减污降碳领域的合作提供了新的平台和工具。各国可以通过共享数字环境监测数据、交流数字减污降碳技术经验等方式加强合作，数字技术可以确保交易数据的透明性和真实性，提高交易效率。同时，通过数字平台，发达国家可以更好地向发展中国家转让先进的减污降碳技术，缩小全球环境治理的技术差距，共同应对全球性的环境问题，为构建人类命运共同体在环境领域发挥积极作用。

1.2 研究内容与研究方法

1.2.1 研究内容

数字经济是促进经济社会绿色低碳转型的有力工具，本文将碳排放与污染排放纳入统一分析框架，用以衡量绿色低碳发展水平，探索数字经济的减污降碳效应，基于 2012-2023 年中国 276 个城市面板数据，构建城市层面的数字经济指标体系，利用 Python 软件对《政府工作报告》的文本分词和关键词词频分析，评估数字经济的发展水平，运用固定效应、中介效应、门槛效应模型，实证检验了数字经济对减污降碳的影响效应及作用机制。进一步，空间溢出视角下，基于 2012-2023 年中国 31 个省份面板数据，运用空间杜宾模型实证分析数字经济对碳排放和污染排放的影响及其空间溢出效应特征。

第 1 章是绪论。首先阐明了本文的研究背景和研究意义，随后概括本文主要内容和研究方法，最后指出本文可能的创新点和不足之处。

第 2 章是理论基础与研究综述。本章对低碳经济学理论和绿色发展等相关理论进行总结，通过对国内外相关文献的梳理与回顾，结合中国数字经济的发展状况及绿色增长的阶段性特点，分析数字经济与中国绿色低碳发展的关系，以探索两者间的作用机理。

第 3 章是机理分析。首先阐述了数字经济的减污降碳效应，其次分析数字经济赋能绿色低碳发展的影响机制，研究数字经济减污降碳的具体路径，最后进行门槛效应检验，并绘制机制效应图。

第 4 章是数字经济赋能绿色低碳发展的实证研究。第一节为变量选取及测度，

第二节为模型构建，第三节为数据说明和描述性统计，第四节是基准回归结果分析，第五节是稳健性检验，第六节是机制检验，第七节是进一步分析，主要包括异质性分析和门槛效应检验。

第 5 章是数字经济赋能绿色低碳发展的空间溢出效应分析。本章在上述分析基础上，以省域面板数据为样本数据，研究数字经济减污降碳的空间溢出效应及作用机制。

第 6 章是结论与政策建议。在前文分析的基础上，对本文实证结果进行归纳总结，并给出数字经济促进绿色低碳发展的政策建议。

1.2.2 研究方法

（1）文献分析法：本文第 2 章通过系统梳理涵盖数字经济、碳排放和污染排放的相关国内外文献，在总结其他学者研究的基础上，提炼本文的研究思路，揭示现有研究的不足，并提出相应的补充性论证，以此扩展和深化研究的广度与深度。在第 4 章中，本文将基于学术界已有的研究成果，系统地梳理并深入分析数字经济对碳排放及污染排放的作用机制。

（2）理论研究法：本研究旨在深入掌握低碳经济学理论和绿色发展理论等核心理论框架。通过对这些理论的深入理解，明确研究的关键问题和研究范围。在此基础上，本研究将运用这些理论对所探讨的课题进行深入的理论分析，以期得出有价值的结论和见解。

（3）实证研究法：首先构建特征词图谱，结合 Python 软件，通过对各城市《政府工作报告》的文本分词和关键词词频分析，测度城市数字经济发展水平；其次，构建基准回归模型和中介效应模型，进一步检验了数字经济对城市减污降碳的影响及作用机制，并检验其稳健性；最后，运用熵值法构建省域数字经济水平综合评价指标体系，基于空间杜宾模型探讨了省域数字经济影响碳排放和污染排放的直接效应和间接效应，从绿色创新和产业集聚视角，运用中介效应模型分析了数字经济对碳排放和污染排放的影响机制。

1.2.3 研究框架

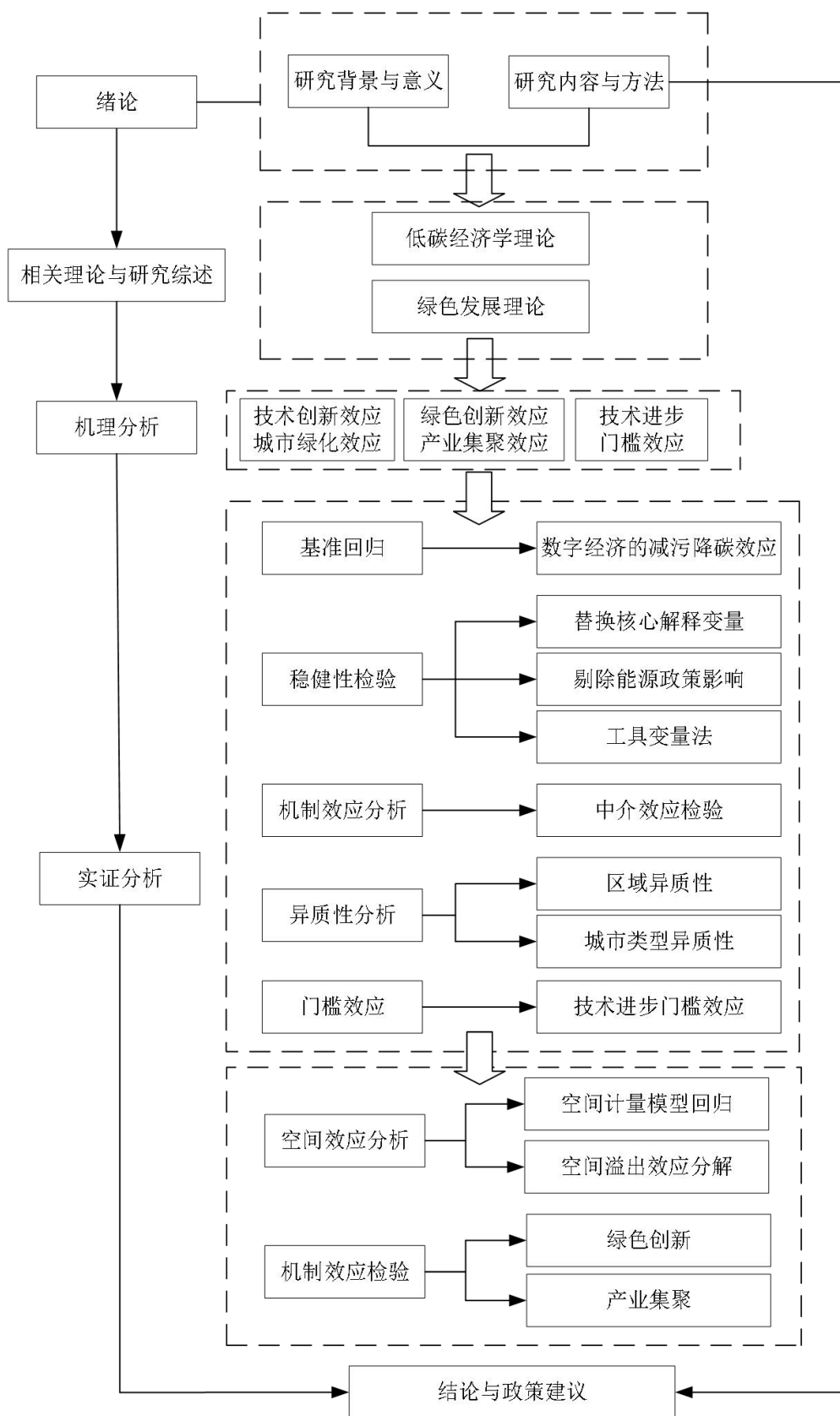


图 1-1 研究框架图

1.3 创新点与不足之处

1.3.1 创新点

(1) 在研究视角上, 现有研究主要从减污或降碳的角度单独考察数字经济的减排效应, 较少有文献将碳排放和污染排放纳入同一框架探索数字经济的减污降碳效应, 本文从碳排放和污染排放视角分析数字经济对绿色低碳发展的影响, 通过比较分析, 揭示数字经济的潜在不足, 并为构建更加完善的数字经济制度提供实证基础, 以促进绿色低碳发展目标的实现。

(2) 在研究方法上, 有关数字经济的测度, 现有文章主要运用熵值法和主成分分析法测算数字经济发展水平, 但运用到地级市层面, 其测算结果可能会存在偏差。本文构建城市层面的数字经济指标体系, 利用 Python 软件对《政府工作报告》的文本分词和关键词词频分析, 评估数字经济的发展水平。进一步, 从新质生产力的角度出发, 探究数字经济对减污降碳的影响机制, 以技术进步和城市绿化为中介变量, 实证检验数字经济对碳排放和污染排放的作用机制, 并引入技术进步水平作为门槛变量, 研究其对碳排放和污染排放的门槛效应, 为数字经济在高质量发展中发挥更大作用提供理论支撑。

(3) 由于不同地区在经济发展、管理能力和互联网建设等方面存在差异, 导致各地区低碳经济的发展不均衡, 进而推动了生产要素的跨区域流动(许金红和钟若愚, 2023)^[2]。因此, 在分析区域数据要素和绿色低碳发展中, 需要考虑空间溢出效应特征的影响, 忽略这种空间溢出效应将导致估计结果的偏差。本文以省域面板数据作为样本, 考虑经济距离和地理距离两种空间权重矩阵, 基于空间杜宾模型探讨了省域数字经济影响碳排放和污染排放的直接效应和间接效应。

1.3.2 不足之处

首先, 当前学术界对数字经济的内涵尚未达成统一共识, 不同学者和机构提出了各自的定义和指标体系。本文在采用相关指标构建数字经济发展的计量指标时, 可能会遇到实证结果的偏差。因此, 指标体系需要进一步的完善和发展, 以提高其可操作性和准确性。其次, 由于我国在数字经济领域的研究相对较晚, 尽管本文努力搜集了较新的数据, 但数据覆盖的时间跨度较短, 仅覆盖了 2012 至 2023 年, 因此, 研究结果可能受到样本时间范围的限制。最后, 本文对城市低

碳发展水平的评估主要从宏观角度进行, 尽管实证检验中分别运用地级市和省域面板数据, 但未能涵盖微观层面的个体数据, 这可能导致评估结果的普遍适用性受限。因此, 未来的研究需要进一步探讨个体层面的行为, 以增强研究的全面性和适用性。

第 2 章 理论基础与研究综述

2.1 理论基础

2.1.1 低碳经济学理论

随着工业化进程的加速，大量温室气体（主要是二氧化碳）的排放导致全球气候变暖。科学研究表明，气候变暖引发了一系列的环境问题，如海平面上升、极端气候事件增多、生态系统破坏等。这使得各国开始重视减少碳排放，低碳经济学理论应运而生。低碳经济的概念最早出现在 2003 年英国的能源白皮书中。学者们对低碳经济的定义存在多样性，但普遍认同其旨在实现应对气候变化和经济发展的双赢目标。张坤民等（2008）^[3]认为低碳经济是以低耗能、低排放、低污染为基础的经济模式，其实质是提高碳生产力，即每排放单位二氧化碳要生产出更多的 GDP，也就是降低碳排放强度。它强调经济活动与碳排放的脱钩，即经济增长不依赖于高碳排放的生产和消费方式。这意味着要改变传统的以高碳能源为基础的经济模式，转向低碳或零碳能源驱动的经济 development 路径。低碳经济学还注重资源的高效利用。这包括能源资源和其他生产资料的有效利用，以减少浪费和降低因资源过度开采与加工带来的碳排放。

作为全球温室气体排放大国，中国在低碳经济领域的探索，对全球气候变化影响深远。低碳经济要求中国从传统的高能耗、高排放的经济增长模式向低碳、环保的模式转型。这种转变有助于实现经济社会的长期可持续发展，并减少对环境的负面影响。通过实施低碳经济政策和措施，中国的温室气体排放增速得到有效遏制，为全球应对气候变化做出了重要贡献。同时，也有助于降低因气候变化带来的自然灾害风险，保障经济社会的稳定发展。低碳经济学理论强调经济、社会 and 环境的协调发展，促使中国在制定发展战略和政策时，更加注重资源的合理利用和生态环境的保护，实现经济社会的可持续发展。

2.1.2 绿色发展理论

传统工业化进程中积累的环境代价催生了绿色发展理念，这一理论创新体现了人类对发展方式的深刻反思与变革诉求。20 世纪中叶，随着工业化进程的加

速,环境污染、生态破坏、资源短缺等问题日益凸显,促使人们开始重新审视经济发展与环境保护的关系。绿色发展理论是一种以人与自然和谐共生为价值导向,强调在经济、社会发展过程中充分考虑生态环境承载能力,通过创新驱动、制度保障等多种手段,实现经济绿色增长、社会公平进步、生态环境良好的可持续发展理念。它要求将绿色理念贯穿于生产、流通、消费等各个环节,从根本上改变传统的高投入、高消耗、高污染的发展模式。

中国政府在绿色发展方面做出了重要战略决策,如中共十八届五中全会提出的绿色发展理念,以及十九大报告中加快建立绿色生产和消费的法律制度和政策导向。中国从“十二五”规划开始就将绿色发展纳入国家发展战略,强调绿色经济和循环经济的发展。到了“十三五”规划,绿色发展与创新发展、协调发展、开放发展、共享发展并列为新时期的五大发展理念。“十四五”规划进一步加快推动绿色低碳发展,促进经济社会发展全面绿色转型。《新时代的中国绿色发展》白皮书全面介绍了新时代中国绿色发展理念、实践与成效,分享了中国绿色发展经验。白皮书强调,中国坚持绿水青山就是金山银山的理念,坚定不移走生态优先、绿色发展之路,促进经济社会发展全面绿色转型,建设人与自然和谐共生的现代化。

2.2 研究综述

2.2.1 数字经济研究

(1) 数字经济的内涵

Tapscott (1996)^[4]出版的《数字经济: 联网智力时代的承诺与风险》首次提出了数字经济的概念。在该书中,其探讨了互联网和计算机技术对商业活动的深刻影响,并认为数字经济主要由信息通信行业以及企业和个人的电子商务构成。不同学者依据研究重点差异给出侧重点各异的定义,但共同勾勒出数字经济作为依托数字技术、驱动产业升级、变革经济模式、重塑社会经济关系的新兴力量全貌。李长江(2017)^[5]通过梳理数字经济概念的起源和传播历程、已有研究成果和存在问题,辨析了数字经济与其他相关概念的关系,认为数字经济的本质特征是以数字技术方式进行生产。魏江等(2021)^[6]阐述数字经济区别于其它经济的核心特征在于数据成为新生产要素、数字技术赋能社会生产方式变革,并从资源、

技术、产权三个视角分析了数据要素特征及其价值实现机制，梳理了数字经济时代社会生产过程变革，初步搭建数字经济学基础框架。陈晓红等（2022）^[7]对数字经济进行了一个相对宽泛的界定：数字经济的内涵包含四个核心内容，分别是数字化信息、互联网平台、数字化技术以及新型经济模式和业态；数字经济以数字化信息为关键资源，以互联网平台为主要信息载体，以数字技术创新驱动为牵引，以一系列新模式和业态为表现形式的经济活动。

从产业视角出发，部分研究把数字经济划分为数字产业化与产业数字化两大部分。数字产业化是指电子信息制造业、软件与信息技术服务业等数字核心产业的发展，这些产业作为数字经济的基础产业，不断创造新的数字产品与服务，如智能手机操作系统、企业办公软件等；产业数字化则是传统产业运用数字技术进行深度改造，提升生产效率与竞争力，像制造业采用工业互联网实现智能制造，农业借助物联网开展精准种植，拓展了产业边界，推动产业融合发展。在经济模式方面，数字经济催生了共享经济、平台经济等新兴模式。Rochet 和 Tirole（2003）^[8]对平台经济进行研究，阐述数字平台作为连接双边或多边市场主体的中介，降低交易成本，打破信息不对称，改变传统产业供应链与价值创造方式。以共享出行平台为例，整合私家车闲置资源，让车主与乘客在平台上高效匹配供需，重构交通出行服务供给模式，实现闲置资源的社会化利用，提升经济运行整体效率，展现数字经济内涵在经济模式变革上的深刻体现。Bukht 和 Heeks（2017）^[9]指出，数字经济是以数字通信网络（如互联网、移动网络）、数字数据存储技术及处理能力为依托，实现经济活动数字化转型。这种观点将数字经济视为一系列先进技术集合驱动下的新经济形态，涵盖大数据、云计算、人工智能等技术赋能商业流程再造、产品创新与服务升级，使企业能更精准地洞察市场需求、优化资源配置，如电商平台利用大数据分析实现精准营销。

（2）数字经济的测度

随着数字经济的迅速发展，如何对其进行有效的测度成为学术界和政策制定者关注的一个重要课题，但如何量化和测度这一新兴经济形态，学术界尚未达成统一意见。传统的宏观经济测度方法难以完全适应数字经济的特殊性质，大多数传统的经济指标，如 GDP、劳动生产率等，并未能充分反映数字技术对经济产生的深远影响。基于产出法是最常见的数字经济测度方法之一，主要通过计算数

数字经济在总产出中的贡献来量化数字经济的规模。经济合作与发展组织（OECD）、美国经济分析局（BEA）等国际机构，构建数字经济卫星账户（DESA），为数字经济测度提供了全面、系统的指导框架。国内学者采用增加值核算方法对数字经济规模进行测算，并积极探索建立数字经济卫星账户。自 2017 年起，中国信息通信研究院持续发布中国各省份数字经济总体规模的测算数据。其采用的指标体系涵盖数字产业化和产业数字化两个方面。除此之外，构建数字经济发展指数也是评估国家或地区数字经济发展水平的重要手段（方颖和余兴锦，2025）^[10]。

研究者基于不同视角，运用不同方法构建指标体系以衡量不同层面数字经济发展水平。范合君和吴婷（2020）^[11]通过生产数字化、消费数字化、流通数字化和政府数字化四个维度，利用主成分分析法和专家打分法测度中国省级数字化水平并对分项指标的变化趋势进行比较评估。陈梦根和张鑫（2022）^[12]基于信息经济测度理论，运用投入产出序列数据，结合数字经济内涵、信息经济理论及增长核算方法，建立数字经济规模和全要素生产率测算框架进行分析。徐慧琳等（2023）^[13]基于数字基础设施、数字产业化和产业数字化三个维度建立了数字经济测度指标体系，并使用熵权法测度省级数字经济发展水平。部分文献通过文本分析法构建企业的数字化转型指数，利用 Python 爬虫功能归集整理上市企业的年度报告，提取所有文本内容，对样本进行分词处理和词频统计，筛选出与数字化转型相关的高频词语并制作成词云图，在既有文献基础上补充关键词形成分词词典，对所有样本进行分词处理，统计关键词的词频数，以衡量企业数字化转型水平（赵宸宇等，2021；吴非等，2021）^[14-15]。

2.2.2 绿色低碳发展研究

（1）绿色低碳发展的测度

绿色低碳发展是全球应对气候变化、实现可持续发展的关键路径。随着绿色低碳发展理念的推广，如何科学、系统地测度绿色低碳发展的现状和进展，成为学术界和政策制定者关注的重要议题。绿色低碳发展测度不仅是对环境影响的定量评估，也涉及到经济、社会和技术的协调发展。绿色低碳发展的测度涉及多维度、多层次的内容，学术界针对这一问题提出了多种方法。主要的研究方法包括：绿色低碳发展指标体系法、综合评价法、数据包络分析法和系统动力学模型等。构建指标体系是绿色低碳发展测度的核心，指标体系通常包括环境、经济和社会

等多个维度，用于反映各国或地区在绿色低碳发展方面的表现。Hua（2023）^[16]提出了一种低碳经济指数，通过多层次的指标评估低碳转型中的不同经济部门。Acheampong 和 Boateng（2019）^[17]应用人工神经网络开发了国家碳排放强度的模型。一些学者提出了绿色 GDP 的概念，试图将环境因素（如污染物排放、资源耗损等）纳入国民经济核算体系中，以便更全面地评估绿色低碳发展的效果。Tan 和 Zhou（2025）^[18]运用 SBM - GML 模型评估中国 31 个省份的全要素碳生产率，用来量化低碳经济发展指数。Zhang 等（2024）^[19]采用熵值法和耦合协调模型探讨了经济增长与碳排放之间的协调水平。低碳经济指数是通过构建一系列关键指标，综合衡量一个国家或地区的低碳经济发展水平。黄永春等（2022）^[20]通过构建绿色低碳发展指标，运用固定效应模型和面板门槛回归模型，探索数字金融对绿色低碳发展的影响机制及门槛效应。

碳排放量是衡量绿色低碳发展最直接的指标之一，通常指某个国家、地区或行业在一定时间内排放的二氧化碳总量。碳强度则是碳排放与经济产出（如 GDP）的比值，反映了单位经济产出所消耗的碳排放量。吴英姿和闻岳春（2013）^[21]通过测算绿色生产率增长指数，实证研究绿色生产率对工业低碳经济发展的作用及影响工业低碳发展的主要因素，研究发现绿色生产率先升后降，对工业低碳发展有显著正向影响，并且对高碳排放强度行业作用更大。梁琳和林善浪（2018）^[22]从碳排放量和碳强度两个层面，考察了中国金融体制对碳排放的影响及潜在传导机制。张荣博和钟昌标（2022）^[23]研究发现政策实施有助于降低县域碳排放规模，提升区域陆地植被固碳量水平，促进县域绿色低碳发展。绿色生产率是综合衡量经济增长与环境成本之间关系的指标。它不仅考虑产出的经济效益，还包括能源消耗和环境影响。通过绿色生产率的测度，可以了解经济活动中资源的利用效率和环境影响。绿色生产率的衡量可以为地方政府制定绿色低碳发展政策提供数据支持，帮助评估不同地区实施低碳政策的效果，优化资源配置，提高区域经济的绿色化水平。

（2）绿色低碳发展的影响因素

绿色低碳发展已成为全球应对气候变化、实现可持续发展的重要战略目标。随着全球变暖问题的日益严峻，各国纷纷承诺减少温室气体排放，加快推进经济发展方式向绿色低碳模式转变。然而，绿色低碳发展并非一蹴而就，它受到多种

因素的影响,涵盖了政策、技术、经济、社会文化等多个层面。绿色低碳发展的实现离不开技术创新,低碳技术的研发和应用在很大程度上决定了绿色发展战略的实施效率。Ding 等(2022)^[24]采用全局熵值法对中国各省份技术创新能力和绿色经济发展水平进行了测算,并运用偏最小二乘法测度了技术创新能力各组成部分对中国绿色经济发展水平的影响,结果表明,在中国省级层面,技术创新能力对绿色经济发展水平具有显著的正向影响。随着储能技术的发展,可再生能源的波动性和不稳定性得到了有效的解决,为大规模应用提供了条件。市场机制的完善对于绿色低碳发展具有深远影响。碳排放权交易、绿色投资、绿色金融等市场机制的建立,为企业提供了强有力的经济激励。绿色金融通过为低碳项目提供融资支持,促进了绿色技术和产业的快速发展。市场力量和经济激励相结合,能够加速绿色低碳技术的普及和市场的成熟。社会文化因素和公众的环保意识也是绿色低碳发展不可忽视的影响因素。随着环境问题的加剧,社会公众对于低碳环保的认知逐渐提升,绿色消费、节能减排的行为逐步渗透到日常生活中。高环境意识的消费者倾向于选择绿色产品和服务,从而推动市场向绿色低碳方向转型。消费者对于低碳产品的需求日益增加,促使企业加大绿色创新力度。

现有文献多侧重于数字经济对碳减排的效应研究(费威等,2022;杨洁和石依婷,2023)^[25-26],研究发现数字经济主要通过产业结构优化、全要素生产率、能源效率等途径显著降低碳排放。谢云飞(2022)^[27]、喻春娇和唐威(2023)^[28]基于省级面板和微观企业视角,实证研究发现数字经济和数字化转型对碳排放强度具有显著的抑制作用。田华文(2023)^[29]指出,数字经济凭借技术创新效应、产业升级效应、生态普惠效应,为提高能源利用效率、降低碳排放强度、重塑生活生态空间创造更多可能性,进而推动绿色低碳发展。部分文献讨论了低碳试点政策和智慧城市试点等政策实施对地区绿色发展的影响(兰梓睿,2021;张荣博和钟昌标,2022)^[30,23],结果表明低碳试点政策的实施有助于降低县域碳排放规模,提升区域陆地植被固碳量水平,显著提高地区绿色发展效率水平。还有部分文献认为,数字经济与碳减排之间存在倒“U”型关系,如刘潭和徐璋勇(2023)^[31]、Liu 等(2024)^[32]等。曹薇等(2023)^[33]研究发现,数字经济对碳排放总量具有显著的促进作用,而绿色技术创新削弱了其促进作用;数字经济对碳排放强度有显著的抑制作用,而绿色技术创新强化了其抑制作用。部分文献分析了数字

经济与污染排放之间的关系（邓荣荣和张翔祥，2022；余典范等，2023）^[34-35]，大多认为数字经济发展有利于抑制污染排放。

2.2.3 数字经济影响绿色低碳发展研究

学术界在探索数字经济如何助力实现“碳达峰”和“碳中和”目标方面，已经积累了大量理论探讨和实证分析的成果。从企业微观视角来看，数字经济正推动企业进行数字化转型，这一转型不仅优化了企业的运营效率，还为企业持续的绿色创新提供了动力（周雪峰等，2022）^[36]。刘承毅和李欣（2023）^[37]研究发现，环境规制能够倒逼高碳制造业企业进行绿色创新，促进高碳制造业绿色低碳发展，数字技术能够显著推动高碳制造业绿色低碳发展。喻春娇和唐威（2023）^[28]研究发现数字化转型有助于缓解工业企业融资约束，从而增强了数字化转型过程的可持续性，并有效地降低了这些企业的碳排放水平。企业数字化转型主要从内部管理优化和产业跨界融合两个维度，推动组织结构的升级、资源的集约利用、运营效率的提高和整体效益的增长，进而促进区域碳减排（张悦等，2024）^[38]。从宏观视角来看，数字经济通过促进技术创新、提高资源配置效率和推动产业结构升级等途径，有效提高了各省碳生产率，而且通过空间溢出效应促进其他省份的碳生产率提升（黎新伍等，2022）^[39]。部分文献研究指出数字经济发展与碳排放之间的关系呈现出一定的非线性特征，具体表现为倒“U”型关系，当数字经济超过区域数字经济规模门槛时，其发展会有利于碳排放强度的降低（缪陆军等，2022；张争妍和李豫新，2022）^[40-41]。白丽飞（2023）^[42]基于市域层面，在分析数字经济发展为区域低碳转型提供了新的动力和路径基础上，进一步阐释政府和市场共同作用下数字经济的碳减排效应。

此外，信息技术的发展改变了传统的生产方式，使得企业可以更加方便地组织和调配跨区域的生产要素，提高生产效率和灵活性。通过数字化、网络化和智能化技术，企业可以更加便捷地进行跨区域的生产要素流动，提高生产效率、降低成本，并推动区域内企业经济合作和发展。郭希宇（2022）^[43]考察绿色金融与低碳经济的内生交互影响及空间溢出效应，研究发现，绿色金融与低碳经济间存在双向促进作用，绿色金融的发展能够有效推进本地区低碳经济转型，绿色金融跨地区对其他地区绿色金融发展产生挤出效应，并且邻近地区低碳经济转型也对本地低碳经济发展带来不利冲击。余畅等（2023）^[44]研究表明企业数字化转型在

推动节能减排方面具有显著的空间溢出效应。王儒奇和陶士贵（2022）^[45]研究表明数字经济在促进本地区实体经济发展的同时，还会对相邻地区的实体经济产生正向空间外溢效应。还有部分文献基于空间视角，研究了数字经济对城乡收入差距、居民消费升级、共同富裕等的影响（杨婧妍和李昱嵩，2023；刘国帅等，2023；古晨光等，2023）^[46-48]。由于不同地区在经济发展、管理能力和互联网建设等方面存在差异，导致各地区低碳经济的发展不均衡，进而推动了生产要素的跨区域流动（许金红和钟若愚，2023）^[2]。

2.2.4 文献述评

综上，现有文献从国家、省份、微观企业等不同视角分析了数字经济对绿色低碳发展的影响，但鲜有研究将碳排放和污染排放纳入同一框架分析；有关数字经济的测度方法，现有文章主要运用熵值法和主成分分析法测算数字经济发展水平，但运用到地级市层面，其测算结果可能会存在偏差。此外，数字经济发展水平对不同经济发展阶段的区域所带来的溢出效应也有所不同，仅仅通过传统面板数据模型无法对区域间的相互影响和结构特征进行有效度量；空间视角下，数字经济发展对碳排放和污染排放的影响机制还需要明确。因此，本文主要从以下方面进行改进：一是在研究绿色低碳发展过程中，将碳排放与污染排放纳入统一分析框架，探索数字经济的减污降碳效应，通过比较分析，揭示数字经济的潜在不足，并为构建更加完善的数字经济制度提供实证基础，以促进绿色低碳发展目标的实现；二是在数字经济指标的测算上，利用大数据技术进行分析，构建城市层面的数字经济指标体系，通过对《政府工作报告》的文本分词和关键词词频分析，评估数字经济的发展水平；三是考虑经济距离和地理距离两种空间权重矩阵，基于空间杜宾模型探讨了省域数字经济影响碳排放和污染排放的直接效应和间接效应；四是从新质生产力的角度出发，探究数字经济对减污降碳的影响机制，以技术进步和城市绿化为中介变量，实证检验数字经济对碳排放和污染排放的中介作用，并引入技术进步水平作为门槛变量，研究其对碳排放和污染排放的门槛效应。

第3章 数字经济对绿色低碳发展的影响及机制分析

3.1 数字经济的减污降碳效应

数字经济本质上属于低碳经济，具有较强的正外部性，往往表现为低能耗、高产出的特征（王香艳和李金叶，2022）^[49]。数字经济推动绿色低碳发展的作用主要体现在提升产出绩效和合理管控碳排放和污染排放两个方面。数字经济发展带动了如新能源、脱碳技术等与能源相关技术的兴起，改进了原有产业组织形态，有助于淘汰高耗能、高污染产业，推动能源的绿色转型，提高能源使用效率，改善环境质量，减少碳排放（王凯等，2021；王帅龙，2023）^[50-51]。从企业层面来看，数字经济发展促进了数字技术的融合与创新，加速了企业数字化和智能化转型、大数据、人工智能等数字技术与企业的深度融合，为企业带来了新的竞争优势，有助于企业有效整合生产决策中的各类信息资源，减少了信息不对称，提升企业生产与管理效率，降低无效生产，企业数字化转型通过促进技术创新和生产经营结构优化实现节能减排，数字技术的采用降低了企业生产中的能源消耗和污染，进而显著减少污染排放。同时，数字经济提供的信息生产要素大量增加，极大提升了企业获取外部信息的能力，有助于企业改善碳排放末端处理和降低碳排放（张三峰和魏下海，2019；郭丰等，2022；孔令章和李金叶，2023）^[52-54]。从政府层面来看，大数据和遥感技术的应用为地方政府提供了实时动态监测空气质量、河流水质和污染排放等环境资源的能力（Hampton, 2013; Shin 等, 2015）^[55-56]，数字技术发展显著优化了传统监管模式，提升了环境监管的效率、精准性和有效性。同时，数字媒介促进了政府与社会的信息共享，便利公众参与环境监督，从而促使政府提高污染治理意愿，加强了社会对政府行为的监督，从而有效促进了排污量的减少（余典范等，2023）^[35]。从产业层面来看，数字经济孕育的数字技术有助于推动产业结构升级、污染产业淘汰，加快生产要素向高效率部门转移的进程，从而提高能源效率和资源配置效率，促进传统产业绿色转型和新兴产业发展，有助于实现减污降碳（Zhang 等, 2013）^[57]。基于上述分析，提出以下假设：

假设 H1：数字经济对减污降碳有促进作用。

3.2 数字经济赋能绿色低碳发展的作用机制

数字技术的广泛应用为减污降碳提供了新路径,新质生产力为绿色低碳发展提供了重要遵循。新质生产力本质上是一种绿色生产力,以创新为主导,突破了传统经济增长模式和生产力发展路径,强调技术驱动、生态优先、绿色低碳发展,因此本文从技术进步和城市绿化两个角度分析数字经济发展赋能减污降碳的作用机制。关于数字经济与技术进步的关系,现有研究普遍认为数字经济能够促进技术进步效率的提高(常皓亮,2023;陈镜宇等,2024)^[58-59],但对于技术进步是否有助于减污降碳,研究结论还具有差异性。一方面,部分文献认为技术进步能够显著降低碳排放和污染排放。数字技术通过加速信息流通,降低企业搜寻匹配和交易成本,使企业能够快速掌握新兴技能与知识,并通过大数据平台有方向地进行创新,降低创新成本(郭沛和王光远,2023)^[60]。在制造业和第三产业等领域,技术赋能尤为重要,数据要素以较低成本实现信息共享,推动技术进步,减少环境污染(刘培,2023)^[61]。数字技术还有助于新能源和新技术的开发与应用,促进产业结构转型升级,提高能源利用效率,降低能耗和污染(Ahmed等,2016;Cheng等,2017)^[62-63]。技术进步被视为城市低碳转型的核心动力,数字经济的发展降低了信息和知识获取成本,加速技术迭代,有效助力城市低碳转型和减污降碳(Li等,2022)^[64]。另一方面,也有文献认为技术进步可能增加碳排放和污染排放,技术使用的增加对环境产生负面影响。技术进步可能会导致单位生产成本降低,激励生产者为了实现利润最大化而增加投入,从而提高产量,导致对能源和资源的需求上升,进而增加碳排放量和污染排放(张思思等,2022)^[65]。Munir和Ameer(2018)^[66]认为,技术加剧了亚洲新兴经济体的环境退化。技术进步虽然提高了能源利用效率,但可能导致产量增加、成本降低,间接提高消费者的购买力,进而引起能源消费需求和碳排放的增加(Chen等,2020)^[67]。基于上述分析,提出以下假设:

假设 H2: 技术进步水平在数字经济的减污降碳过程中发挥中介效应。

假设 H3: 技术进步水平在数字经济的减污降碳过程中发挥遮掩效应。

坚持生态优先原则,提高城市绿化水平,是实现城市可持续发展的关键策略。一方面,植树造林作为固碳的重要途径,对于提升中国的能源利用效率和减少碳排放具有显著效果,并在城市生态保护中扮演着关键角色(Wang等,2017;Jin

等, 2021) [68-69]。数字经济借助技术创新, 能够提高城市植树造林的效率, 进而促进碳汇的增长和城市绿化水平的提升 (Li 等, 2022; 王维国等, 2023) [64,70]。技术创新的智能、绿色和低碳特性, 有助于缓解经济增长和生态环境之间的矛盾 (Hasan 和 Tucci, 2010) [71]。数字经济可以为城市绿化提供技术支持和创新动力, 新技术的应用与普及, 有助于推动绿色产业的发展, 促进可再生能源、清洁能源和环保技术的应用和推广。数字经济通过数字产业化和产业数字化等发展模式, 产生了巨大的经济效益和潜在的环境效益, 有助于推动高附加值产业技术要素的积累, 加速城市绿色低碳转型。另一方面, 数字技术在生态修复和环境治理中的深入应用, 为造林规划提供了精准、科学的依据, 实现实时监测和预警, 有助于降低城市绿化的成本, 提升森林的碳汇能力。城市绿化作为资源配置的一部分, 可以提高土地利用效率, 减少城市扩张对碳排放的影响, 同时, 城市绿化可以调节局部气候, 从而减少建筑物的能源消耗。城市绿化水平的提高可以显著提升城市的碳吸收能力和对污染物的吸收和过滤。Ren 等 (2022) [72] 提出数字经济的集聚效应可以通过优化能源消耗、产业结构和技术创新等途径促进城市绿色经济的增长。数字经济的发展不仅增强了居民对城市绿化和低碳环保理念的认识, 鼓励公众积极参与城市绿化建设和保护, 而且为城市的绿色低碳转型注入了活力, 有效促进碳减排和污染减排, 为可持续发展提供了持久的推动力 (Zhang 等, 2022) [73]。基于上述分析, 提出以下假设:

假设 H4: 数字经济可以通过提升城市绿化水平促进减污降碳。

数字经济本身具有环境友好型的特点, 其可以通过畅通人才、信息流通等渠道提升绿色技术创新水平, 有助于绿色技术创新体系的构建, 减少区域污染排放, 促进区域低碳发展。其次, 数字技术正在成为推动新能源技术开发、应用以及产业结构转型的重要力量。它通过优化能源利用效率, 助力减少能源消耗和环境污染 (Ahmed 等, 2016; Cheng 等, 2017) [62-63]。数字经济有助于识别不同地区绿色创新水平的差异, 感知居民对发展的多层次需求, 弥补短板, 促进绿色低碳发展 (赵彤彤等, 2023) [74]。最后, 数字经济激发了政府和社会对环境的关注度, 显著降低碳排放, 推动城市绿色创新, 促进绿色创新“增量提质”, 是推动人与自然和谐共生的重要力量 (吕德胜等, 2023) [75]。数字经济将数字技术运用到生产和管理环节, 不仅改善资源整合和信息处理能力, 优化资源配置, 而且使得生

产端和消费端减少资源消耗，高碳排放、高耗能企业向低碳化、无碳化转型（张哲华和钟若愚，2023）^[76]，促进区域和企业绿色发展。根据以上分析，提出以下假设：

假设 H5：数字经济通过加强绿色技术创新间接促进减污降碳。

产业在空间层面的集聚是经济活动显著的地理特征（张华和梁进社，2007）^[77]。产业集聚、碳排放和污染排放的关系主要体现在两方面。一方面，Zhou 等（2024）^[78]认为绿色发展水平与各地区产业结构密切相关，实现产业集聚可以优化产业结构，有利于提高区域经济绿色发展效率。数字经济可以提供丰富的数据要素资源，加强各城市之间的合作联系，提高产业集聚程度，从而促进城市经济绿色发展（王磊等，2023）^[79]。产业集聚可以通过规模经济、共享基础设施、技术创新和知识溢出等效应，提高资源利用效率，促进环保技术的应用，从而有助于减少碳排放和污染排放。另一方面，熊万等（2020）^[80]研究表明，高技术产业集聚对环境污染的影响存在倒“U”型效应，产业集聚的环境污染效应具有边际递减规律，即随着产业集聚水平的进一步提高，其环境污染减缓效应会更加明显，这表明在一定的集聚水平之后，产业集聚对环境的负面影响会逐渐减弱。根据以上分析，提出以下假设：

假设 H6：数字经济通过提升产业集聚水平间接促进减污降碳。

3.3 技术进步的门槛效应

数字经济的减污降碳效应受多种因素影响，存在不确定性，其作用可能在不同技术进步水平下表现出非线性特征。一方面，企业生产过程中的技术进步会提升生产效率，增加清洁能源使用比例，减少生产中的碳排放和污染排放，同时推动绿色和清洁生产，生产更多符合环保要求的产品，促进低碳消费，产生正外部性（曾刚等，2021）^[81]。另一方面，企业在提升技术进步水平的过程中，会加大科技创新投入，进而导致融资成本上升。企业为提高盈利水平，往往会扩大生产规模，这在一定程度上会加剧企业的碳排放和污染排放（曹薇等，2023）^[33]。当技术进步水平较低时，由于能源结构和效率未得到充分技术优化，难以提高生产率以及实现资源的有效利用，数字经济通过技术进步促进减污降碳的边际效应较小，数字经济的发展反而会刺激企业扩大产能，使碳排放增加。同时，技术进步可能会催生新兴产业，如促进对化石燃料依赖较强的行业的扩张，这些产业在发

展初期可能有较高的碳排放和污染排放。随着数字技术在传统及能源行业的深度融合，企业在利润获取上获得相对优势，这将促进其持续推进数字技术的创新升级。当数字技术创新所带来的能源边际产出效率超出其边际能源消耗，企业碳排放和污染排放可能达到转折点（葛立宇等，2022）^[82]。新技术推动数字经济发展，有助于提高能源环境效率和促进能源消费转型，降低污染治理成本，推动社会低碳技术进步，进而促进减污降碳（刘潭和徐璋勇，2023）^[31]。根据上述分析，提出以下假设：

假设 H7：技术进步水平对数字经济的减污降碳效应存在门槛效应。

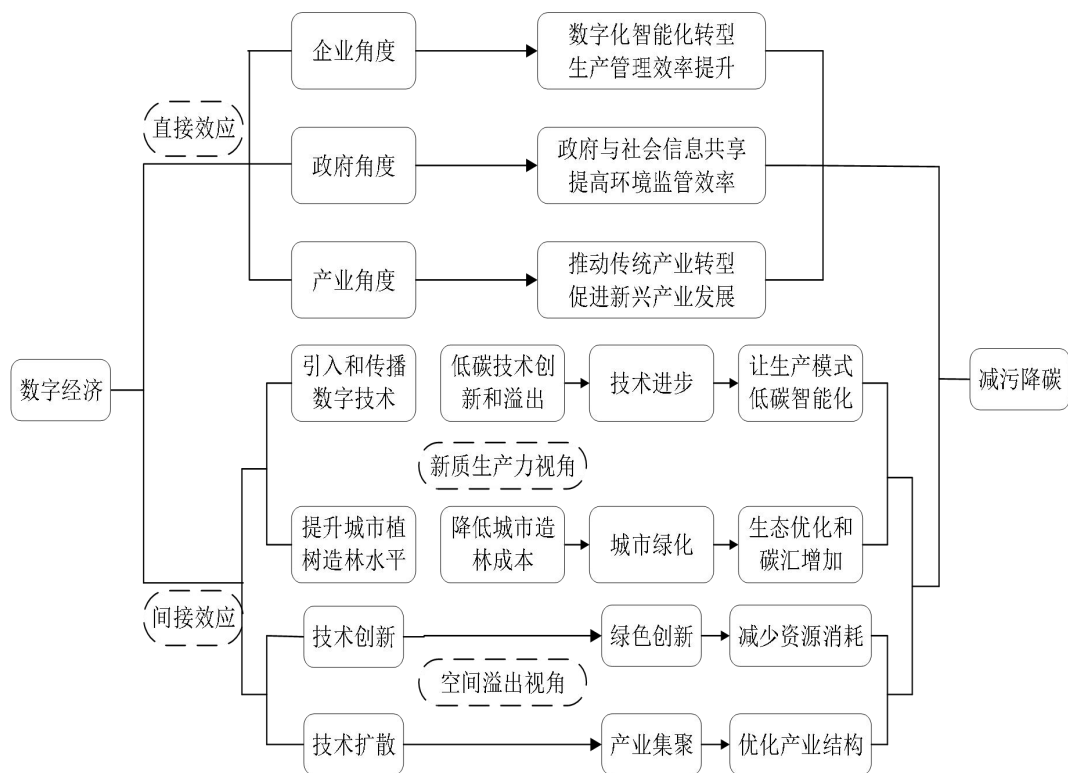


图 3-1 数字经济赋能绿色低碳发展的影响机制

3.4 本章小结

“绿色发展是高质量发展的底色，新质生产力本身就是绿色生产力。必须加快发展方式绿色转型，助力碳达峰碳中和”。在“碳达峰”和“碳中和”的双重目标约束下，协同推进减污降碳是中国推动绿色低碳发展的关键举措，发展新质生产力是我国实现绿色低碳转型，保障能源安全的关键路径。本章分别从直接效应、间接作用机制和空间溢出效应三个方面分析数字经济对碳排放和污染排放的

影响。首先，阐述了数字经济影响碳排放和污染排放的机制。一方面，数字技术有助于新能源和新技术的开发与应用，促进产业结构转型升级，提高能源利用效率，降低能耗和污染；另一方面，技术进步可能增加碳排放和污染排放，技术使用的增加对环境产生负面影响。其次，植树造林作为固碳的重要途径，对于提升中国的能源利用效率和减少碳排放具有显著效果，数字经济的发展为城市的绿色低碳转型注入了活力，为可持续发展提供了持久的推动力。最后，考虑不同技术进步水平下，数字经济对碳排放和污染排放的影响可能存在非线性，一方面，企业生产过程中的技术进步会提升生产效率，减少生产中的碳排放和污染排放；另一方面，企业为提高盈利水平，往往会扩大生产规模，这在一定程度上会加剧企业的碳排放和污染排放。

第 4 章 数字经济赋能绿色低碳发展的实证研究

4.1 变量测度与选取说明

4.1.1 被解释变量

本文研究的被解释变量为绿色低碳发展水平，从碳排放和污染排放的视角研究，包括二氧化碳排放（Carbon）和污染排放（So₂）。参考丛建辉等（2014）^[83]，二氧化碳排放量的测算包括范围 1（城市内直接碳排放）、范围 2（城市外与能源相关的间接碳排放）和范围 3（城市内活动发生但未包含在范围 2 的其他间接碳排放）的碳排放总量，并采用碳排放总量与实际 GDP 比值衡量城市的碳排放强度。对于污染排放量的测算，参考胡剑波和陈行（2023）^[84]，将大气主要污染物二氧化硫和氮氧化物排放量作为污染排放当量，并以污染排放当量与实际 GDP 比值衡量城市的污染排放水平。

4.1.2 核心解释变量

本文核心解释变量为数字经济发展水平（Dig）。诸多文献从宏观和微观视角，如国家、省级、行业及企业层面，评估数字产业化和产业数字化的发展程度，以反映数字经济发展水平（罗茜等，2022；吴传清和邓明亮，2023）^[85-86]。通常，数字产业化主要采用数字产业的行业增加值来衡量，产业数字化主要采用数字技术对传统产业产出增长的贡献来衡量（杨刚强等，2023）^[87]。本文研究着眼于城市层面数据，如果采用上述方法存在以下问题：首先，数字技术的迅猛发展和广泛应用催生了众多新兴数字行业，使用固定的行业分类来评估动态变化的数字产业化水平，存在统计偏差；其次，由于产出增长可能源自多种因素，因此数字技术对传统产业的改造和提升效果难以单独量化；最后，城市层面相关指标数据的获取存在一定困难。数字经济可以概括为基于互联网、大数据、云计算、人工智能、物联网、区块链等数字技术和数字化技术的经济活动，涵盖了通过数字化技术进行的生产、分配和消费活动。数字经济已经上升为国家战略，受到各级政府的高度关注与支持。其发展不仅被视为驱动经济增长的新引擎，也是加速产业转型和优化社会治理的关键手段。在政策制定与执行层面，数字经济被明确列为优

先发展的关键领域。相应地，政府的年度报告中包含了对数字经济发展情况的全面总结和对未来发展方向的战略指导。基于此，本文从《政府工作报告》中提取了与“数字技术”相关的词频数据，以此作为衡量地区数字经济发展水平的指标。具体地，基于人工智能、大数据、云计算、区块链、数字技术应用等五个维度构建数字经济特征词图谱（见表 4-1），运用 Python 软件整理各城市年度《政府工作报告》，根据特征词图谱，对其进行分词处理，用关键词总词频数来衡量城市数字经济发展水平。

表 4-1 数字经济特征词图谱

类型	细分指标
人工智能	人工智能，商业智能，高端智能，移动智能，智能控制，自动监测，一体化，集成化，集成控制，虚拟化，图像理解，投资决策辅助系统，智能数据分析，智能机器人，机器学习，深度学习，语义搜索，生物识别技术，人脸识别，语音识别，身份验证，自动驾驶，自然语言处理
大数据	大数据，数据网络，数据平台，数据中心，数据科学，数字化，数据挖掘，文本挖掘，数据可视化，异构数据，征信，增强现实，混合现实，虚拟现实，数据信息
云计算	云计算，云 IT，云服务，云平台，云生态，流计算，图计算，内存计算，多方安全计算，类脑计算，绿色计算，认知计算，融合架构，亿级并发，EB 级存储，物联网，信息物理系统
区块链	区块链，数字货币，分布式计算，差分隐私技术，智能金融合约
数字技术应用	移动互联网，互联网业务，互联网模式，互联网平台，互联网+，工业互联网，移动互联，互联网医疗，电子商务，移动支付，第三方支付，NFC 支付，智能能源，B2B，B2C，C2B，C2C，O2O，网联，智能制造，智能技术，智能穿戴，智慧农业，智能交通，智能医疗，智能客服，智能家居，智能投顾，智能文旅，智能环保，智能电网，智能营销，数字营销，无人零售，互联网金融，数字金融，Fintech，金融科技，量化金融，开放银行

4.1.3 控制变量

为控制其他潜在因素对实证结果的影响，本文加入以下控制变量：人口规模（Popu），用户籍人口的对数衡量；外资化程度（Fdi），用外资利用金额与 GDP 的比值的对数衡量；信息化程度（Tele），用固定电话用户数的对数度量；产业结构（Inds），用第二产业增加值与第三产业增加值的比值衡量；政府财政能力（Budg），用一般公共预算支出的对数度量；人力资本（Humc），用教育支出的对数衡量；消费活跃度（Cona），用社会消费品零售额的对数衡量；地区面积（Area），用行政区域面积的对数度量；能源强度（Ener），用单位 GDP 的能源消费量衡量。

4.1.4 中介变量

与传统生产力相比，新质生产力是技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级所孕育的现代先进生产力。其发展依赖于创新驱动和科技支撑，特别是颠覆性技术和前沿技术的重大突破，这构成了新质生产力的核心特征和发展基础。新质生产力本质上是一种绿色生产力，生态优先原则为其创新提供了方向和目标。城市绿化作为绿色发展的关键举措，通过扩大城市绿色空间、提升生态承载力，为新质生产力的发展创造了良好的生态环境。将技术进步水平和城市绿化水平作为中介变量，其中，城市技术进步水平（Tec）采用每万人发明专利获得量来衡量；城市绿化水平（Gre）用每万人的绿色覆盖率来衡量（Zhang 等，2022）^[73]。

4.2 模型构建

为检验数字经济的减污降碳效应，本文构建以下基准模型：

$$Y_{it} = \beta_0 + \beta_1 Dig_{it} + \sum \lambda_j X_{ijt} + \mu_i + \mu_t + \mu_p + \varepsilon_{it} \quad (4-1)$$

其中， Y 表示因变量，包括碳排放 $Carbon$ 和污染排放 So_2 ， Dig 表示解释变量，即各城市的数字经济发展水平， i 表示城市， t 表示年份， X_{it} 表示一系列控制变量， ε_{it} 为独立的随机扰动项， β ， λ 为回归系数， μ_i ， μ_t 和 μ_p 分别表示个体、时间和省份固定效应系数。

为检验数字经济减污降碳效应的作用机制，构建中介效应模型：

$$M_{it} = \partial_0 + \partial_1 Dig_{it} + \sum \eta_j X_{ijt} + \mu_i + \mu_t + \mu_p + \varepsilon_{it} \quad (4-2)$$

$$Y_{it} = \partial_2 + \partial_3 dig_{it} + \partial_4 M_{it} + \sum \eta_j X_{ijt} + \mu_i + \mu_t + \mu_p + \varepsilon_{it} \quad (4-3)$$

其中， M_{it} 为中介变量，包括技术进步和城市绿化水平， X_{it} 为一系列控制变量。若模型（4-2）中 ∂_1 和模型（4-3）中 ∂_3 显著，且模型（4-3）中 ∂_3 相较于模型（4-1）中 β_1 绝对值减小，则说明存在显著的中介效应。若模型（4-2）中 ∂_1 和模型（4-3）中 ∂_3 ， ∂_4 显著，且 $\partial_1 * \partial_4$ 符号与 ∂_3 符号相反，则存在遮掩效应。

为进一步数字经济减污降碳效应的门槛效应，构建门槛模型：

$$Carbon_{it} = \gamma_0 + \gamma_1 Dig_{it} \times I(q_{it} \leq \tau_1) + \gamma_2 Dig_{it} \times I(q_{it} > \tau_1) + \theta q_{it} + \sum \delta_j X_{ijt} + \mu_i + \mu_t + \mu_p + \varepsilon_{it} \quad (4-4)$$

$$So_{2it} = \gamma_3 + \gamma_4 Dig_{it} \times I(q_{it} \leq \tau_2) + \gamma_5 Dig_{it} \times I(q_{it} > \tau_2) + \theta q_{it} + \sum \delta_j X_{itj} + \mu_i + \mu_t + \mu_p + \varepsilon_{it} \quad (4-5)$$

其中I为指示函数， q_{it} 为门槛变量技术进步水平， τ_1 和 τ_2 为门槛值。

4.3 数据说明与描述性统计

本文选取中国 276 个地级市的面板数据作为样本，在时间跨度上，考虑到样本数据的可获得性，选取 2012 年至 2023 年的面板数据，即中国 2012—2023 年 276 个地级市面板数据为样本。专利数据来自 CNRDS 数据库，其他数据来自《中国统计年鉴》、《中国能源统计年鉴》、《中国工业统计年鉴》、《中国城市统计年鉴》及 Wind 数据库。主要变量定义和描述性统计结果分别见表 4-2 和表 4-3。

表 4-2 主要变量及其定义

变量名称	变量符号	定义及说明
碳排放	Carbon	城市碳排放总量/实际 GDP
污染排放	So ₂	大气主要污染物二氧化硫和氮氧化物排放总量/GDP
数字经济	Dig	各城市年度《政府工作报告》关键词总词频数
技术进步	Tec	每万人发明专利获得量
城市绿化	Gre	每万人的绿色覆盖率
人口规模	Popu	Ln（户籍人口）
外资化程度	Fdi	Ln（外资利用金额/GDP）
信息化程度	Tele	Ln（固定电话用户数）
产业结构	Inds	第二产业增加值/第三产业增加值
政府财政能力	Budg	Ln（一般公共预算支出）
人力资本	Humc	Ln（教育支出）
消费活跃度	Cona	Ln（社会消费品零售额）
地区面积	Area	Ln（行政区域面积）
能源强度	Ener	单位 GDP 的能源消费量

表 4-3 描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
Carbon	3312	1.300	0.602	0.109	3.384
So ₂	3312	1.368	0.894	0.008	5.374
Dig	3312	9.781	6.141	0.000	63.000
Tec	3312	9.347	0.770	7.423	11.410
Gre	3312	0.149	0.130	0.013	0.951
Popu	3312	5.885	0.659	3.807	7.301
Fdi	3312	1.128	0.531	0.157	5.297
Tele	3312	14.350	2.578	4.769	16.790
Inds	3312	13.220	0.727	10.092	15.290
Budg	3312	6.479	0.999	3.357	9.293
Humc	3312	3.732	0.886	0.265	8.392
Cona	3312	2.758	1.116	0.020	7.329
Area	3312	0.825	1.401	0.011	8.381
Ener	3312	0.409	0.050	0.195	0.592

4.4 基准回归结果分析

基准回归结果如表 4-4 所示。其中，第（1）和第（3）列仅固定了个体效应，第（2）和第（4）列固定了个体、省份和年份效应。由表 4-4，第（1）-（4）列核心解释变量（Dig）的系数均显著为负，证实了数字经济能够有效抑制碳排放以及污染排放，促进城市绿色低碳发展，假设 H1 得到验证。

表 4-4 基准回归结果

变量	(1) Carbon	(2) Carbon	(3) So ₂	(4) So ₂
Dig	-0.003*** (-4.137)	-0.003*** (-3.794)	-0.012*** (-5.264)	-0.005*** (-3.005)
Popu	-0.235** (-2.287)	-0.234** (-2.260)	0.744*** (2.788)	0.516* (1.921)
Fdi	-0.018** (-2.289)	-0.018** (-2.148)	-0.006 (-0.226)	-0.045* (-1.960)
Tele	-0.007 (-0.579)	-0.007 (-0.524)	0.304*** (4.123)	0.021 (0.472)

续表 4-4 基准回归结果

变量	(1) Carbon	(2) Carbon	(3) So ₂	(4) So ₂
Inds	-0.077*** (-5.133)	-0.081*** (-4.699)	0.323*** (4.725)	-0.064 (-1.230)
Budg	-0.002* (-1.964)	-0.002 (-0.516)	-0.020*** (-5.775)	-0.025*** (-3.520)
Humc	-0.0909*** (-3.099)	-0.082** (-2.554)	-0.813*** (-6.323)	0.011 (0.158)
Cona	-0.223*** (-8.680)	-0.235*** (-7.536)	-0.458*** (-5.390)	-0.114* (-1.834)
Area	0.009 (0.254)	0.008 (0.233)	-0.069 (-0.374)	-0.190 (-1.271)
Ener	0.126** (2.178)	0.119* (1.870)	-0.923*** (-3.276)	0.388 (1.585)
常数项	5.458*** (9.304)	5.415*** (8.698)	10.402*** (4.507)	1.166 (0.616)
个体固定效应	是	是	是	是
省份固定效应	否	是	否	是
年份固定效应	否	是	否	是
N	3312	3312	3312	3312
R ²	0.941	0.941	0.751	0.843

注：***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平上拒绝原假设，结果显著，下表同。

4.5 稳健性检验

1.替换核心解释变量。参考鲁玉秀等（2021）^[88]的研究，从数字产业收益、数字化人员基础和数字产业应用基础三个维度构建指标体系，运用熵值法计算城市数字经济发展水平（Dig_r），替换数字经济（Dig）进行回归，结果见表 4-5 第（1）和第（2）列，数字经济（Dig_r）的系数均在 1%水平上显著为负，与基准回归结果一致。

2.剔除能源政策的影响。在中国推进绿色发展的过程中，实施了有关减污降碳的政策，相关政策实施对不同城市的影响具有异质性，本文考虑样本期内具有重要影响的能源政策：一是 2010 年中国启动第一批低碳城市试点的基础上，2012 年又新增了第二批低碳试点，包括 27 市；二是 2013 年中国启动了部分省市的碳排放权交易试点。剔除上述政策所包含的试点城市，进行稳健性检验，结果见表 4-5 第（3）和第（4）列，数字经济（Dig）的系数均显著为负，结果仍然稳健。

表 4-5 稳健性检验

变量	替换核心解释变量		剔除能源政策	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
Digr	-0.246*** (-3.062)	-1.096*** (-5.729)		
Dig			-0.002* (-1.906)	-0.005** (-2.436)
Popu	-0.287*** (-2.678)	0.284 (1.186)	-0.443*** (-3.215)	-0.272 (-1.173)
Fdi	-0.019** (-2.264)	-0.047** (-2.009)	-0.023*** (-2.735)	-0.053* (-1.881)
Tele	-0.007 (-0.525)	0.020 (0.462)	-0.016 (-1.119)	0.019 (0.369)
Inds	-0.084*** (-4.867)	(0.076) (-1.530)	-0.075*** (-3.937)	(0.032) (-0.603)
Budg	(0.001) (-0.384)	-0.023*** (-3.426)	(0.002) (-0.589)	-0.030*** (-3.72)
Humc	-0.077** (-2.353)	0.029 (0.445)	-0.081** (-2.058)	0.033 (0.406)
Cona	-0.233*** (-7.499)	-0.102 (-1.634)	-0.219*** (-6.071)	-0.084 (-1.10)
Area	0.011 (0.323)	-0.151 (-1.138)	0.035 (0.609)	-0.084 (-1.373)
Ener	0.129** (1.969)	0.429* (1.746)	0.099 (1.302)	0.615** (2.091)
常数项	5.589*** (9.161)	1.846 (1.105)	6.301*** (8.226)	4.413*** (3.289)
个体固定效应	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
N	3312	3312	2388	2388
R ²	0.941	0.844	0.941	0.834

3.工具变量法。由于数字技术推动产业优化，助力减污降碳，同时，环保政策促使企业数字化转型，带动数字经济发展，数字经济发展与减污降碳之间存在反向因果关系，因此，模型可能存在内生性问题。参考黄群慧等（2019）^[89]，采用上一年度全国信息技术服务收入与 1984 年每百万人邮局数量的交乘项作为工具变量（Iv）进行二阶段最小二乘法回归，结果如表 4-6 所示。表 4-6 第（1）列第一阶段工具变量（Iv）对解释变量（Dig）的回归结果显示，工具变量与数字经济之间在 1%水平上显著为正，满足工具变量相关性的要求；第（2）和第（3）

列显示, Kleibergen–Paap rk Wald F 统计量的值在 10%显著性水平上高于临界值, 内生性检验的 P 值小于 0.05, 表明工具变量有效。解释变量 (Dig) 的系数在 1% 水平上显著为负, 说明在引入工具变量减轻内生性问题的影响后, 本文主要结论依然成立。综上所述, 研究结论具有较强的稳健性。

表 4-6 内生性检验

变量	第一阶段	第二阶段	
	(1) Dig	(2) Carbon	(3) So ₂
Dig		-0.008*** (-2.752)	-0.014*** (-2.674)
Iv	0.5840*** (5.521)		
Kleibergen–Paap rk Wald F 统 计量		30.488	30.493
Endogeneity test (P 值)		0.017	0.045
Popu	-1.226 (-0.472)	-0.181** (-2.004)	0.538** (2.070)
Fdi	0.239 (1.430)	-0.016** (-2.255)	-0.041** (-2.179)
Tele	-0.637 (-1.572)	-0.017 (-1.496)	0.015 (0.357)
Inds	0.265 (0.633)	-0.087*** (-6.383)	-0.038 (-0.787)
Budg	-0.092** (-1.164)	-0.002 (-0.705)	-0.022*** (-3.555)
Humc	0.334 (0.441)	-0.092*** (-3.145)	-0.043 (-0.632)
Cona	0.214 (0.318)	-0.239*** (-11.633)	-0.125** (-2.034)
Area	5.439*** (2.294)	0.064 (0.876)	-0.340 (-1.461)
Ener	0.450 (0.269)	0.112** (2.360)	0.139 (0.828)
个体固定效应	是	是	是
省份固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
N	3312	3312	3312
R ²	0.562	0.178	0.160

4.6 机制效应检验

根据前文分析, 数字经济可以通过新质生产力这一途径作用于减污降碳, 为

厘清数字经济影响碳排放和污染排放的作用机制，具体从技术进步和城市绿化两个层面分析，分别检验技术进步水平和城市绿化水平是否在数字经济对碳排放和污染排放的影响中起到中介作用，本文分别以碳排放和污染排放作为被解释变量，通过逐步回归法进行机制效应检验，结果见表 4-7、表 4-8。

表 4-7 机制检验：技术进步水平

变量	(1) Tec	(2) Carbon	(3) Carbon	(4) So ₂	(5) So ₂
Dig	0.006** (2.302)	-0.003*** (-3.793)	-0.003*** (-3.883)	-0.005*** (-3.005)	-0.006*** (-3.306)
Tec			0.018** (2.533)		0.093*** (5.091)
Popu	2.737*** (3.147)	-0.234** (-2.260)	-0.285*** (-2.720)	0.516* (1.921)	0.262 (1.017)
Fdi	-0.020 (-1.049)	-0.017** (-2.147)	-0.017** (-2.086)	-0.045* (-1.960)	-0.043* (-1.876)
Tele	-0.030 (-0.547)	-0.007 (-0.524)	-0.006 (-0.480)	0.020 (0.472)	0.023 (0.550)
Inds	0.352*** (4.812)	-0.081*** (-4.699)	-0.087*** (-5.029)	-0.063 (-1.229)	-0.097* (-1.874)
Budg	-0.008 (-0.573)	-0.001 (-0.515)	-0.002 (-0.479)	-0.024*** (-3.520)	-0.023*** (-3.471)
Humc	0.323** (2.228)	-0.082** (-2.554)	-0.088*** (-2.741)	0.011 (0.158)	-0.019 (-0.282)
Cona	-0.265** (-2.533)	-0.235*** (-7.536)	-0.230*** (-7.386)	-0.113* (-1.834)	-0.088 (-1.395)
Area	-0.486 (-1.194)	0.008 (0.233)	0.017 (0.456)	-0.190 (-1.271)	-0.145 (-1.223)
Ener	-1.022*** (-4.707)	0.119* (1.870)	0.138** (2.099)	0.387 (1.584)	0.483* (1.964)
常数项	-13.317** (-2.227)	5.414*** (8.697)	5.669*** (8.932)	1.165 (0.615)	2.400 (1.541)
个体固定效应	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
N	3312	3312	3312	3312	3312
R ²	0.848	0.941	0.941	0.843	0.846

1.技术进步水平机制检验。表 4-7 给出了技术进步水平机制检验，其中第（1）列为数字经济（Dig）对技术进步水平的回归结果；第（2）、（4）列为数字经济（Dig）对碳排放和污染排放的基准回归结果；第（3）、（5）列为加入中介变量后的回归结果。由表 4-7 第（1）列，数字经济对技术进步水平的影响显著

为正。加入中介变量后，第（3）和第（5）列中介变量（Tec）系数均在 1%水平上显著为正，则中介模型公式（4-2）和（4-3）中的 $\partial_1 * \partial_4$ 符号为正，表明数字经济对碳排放和污染排放的间接效应为正；第（3）和第（5）列数字经济（Dig）的系数依然显著为负，即数字经济对碳排放和污染排放的直接效应为负，与间接效应符号相反，可以判断技术进步水平对数字经济影响碳排放和污染排放过程中存在遮掩效应，本文假设 H3 成立。

表 4-8 机制检验：城市绿化水平

变量	(1) Gre	(2) Carbon	(3) Carbon	(4) So ₂	(5) So ₂
Dig	0.002** (2.542)	-0.003*** (-3.793)	-0.002*** (-3.554)	-0.005*** (-3.005)	-0.004*** (-2.757)
Gre			-0.319** (-2.512)		-0.947*** (-2.867)
Popu	-0.015 (-0.949)	-0.234** (-2.260)	-0.239** (-2.299)	0.516* (1.921)	0.503* (1.914)
Fdi	0.001 (0.521)	-0.017** (-2.147)	-0.017** (-2.120)	-0.045* (-1.960)	-0.044* (-1.926)
Tele	-0.001 (-0.368)	-0.007 (-0.524)	-0.007 (-0.555)	0.020 (0.472)	0.019 (0.442)
Inds	-0.003 (-1.144)	-0.081*** (-4.699)	-0.081*** (-4.780)	-0.063 (-1.229)	-0.067 (-1.306)
Budg	-0.001 (-0.623)	-0.001 (-0.515)	-0.001 (-0.563)	-0.024*** (-3.523)	-0.024*** (-3.621)
Humc	-0.004 (-0.581)	-0.082** (-2.554)	-0.083*** (-2.618)	0.011 (0.152)	0.007 (0.102)
Cona	0.012** (2.112)	-0.235*** (-7.536)	-0.231*** (-7.416)	-0.113* (-1.834)	-0.101* (-1.660)
Area	0.003 (0.572)	0.008 (0.233)	0.009 (0.265)	-0.190 (-1.271)	-0.187 (-1.233)
Ener	0.009 (0.508)	0.119* (1.870)	0.122* (1.883)	0.387 (1.584)	0.397 (1.630)
常数项	0.448*** (4.275)	5.418*** (8.697)	5.558*** (8.976)	1.165 (0.615)	1.581 (0.830)
个体固定效应	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是
N	3312	3312	3312	3312	3312
R ²	0.505	0.941	0.941	0.843	0.844

2.城市绿化水平机制检验。表 4-8 给出了城市绿化水平对数字经济影响碳排放和污染排放发挥的中介效应。第（1）列数字经济（Dig）的系数显著为正，说

明数字经济对城市绿化水平存在显著的正向促进作用。加入中介变量后，数字经济（Dig）的系数依然显著为负，但相较不加中介变量的系数绝对值减小，反映出在数字经济对碳排放和污染排放的影响过程中，城市绿化水平起到中介作用，说明数字经济可以通过提高城市绿化水平，间接降低碳排放和污染排放，本文假设 H4 成立。

4.7 进一步分析

4.7.1 区域异质性

数字经济作为一种新的经济形态，不同区域、不同类型城市的数字经济对碳排放和污染排放的影响不同。本文根据国家统计局经济区域划分标准，将地级市所在省份划分为东、中、西部地区分组进行回归，结果见表 4-9。结果表明，东中部地区数字经济（Dig）对碳排放具有显著的抑制作用，西部地区数字经济（Dig）系数为负，但不显著；东部地区数字经济（Dig）对污染排放具有显著的抑制作用，中西部地区不显著，但符号为负。综合可以反映出，数字经济对碳排放和污染排放的影响存在区域异质性，可能的原因在于不同区域数字经济发展水平不同，导致数字经济带来的边际减污降碳效用存在差异。首先，东部地区具有区位优势，数字经济基础设施建设较为发达，能够以较低成本获取绿色技术和创新知识，促进城市间信息与资源的共享，推动减污降碳。相比之下，西部地区的数字经济发展相对滞后，可能在获取和应用绿色技术方面面临障碍，导致减污降碳效果不明显。此外，由于经济发展水平的差异，东部地区持续吸引中西部地区的人才和资本，更倾向于发展高附加值的服务业，减少环境排放。与此同时，随着高碳产业向中西部地区转移，这些地区不仅要应对本地的环境问题，还需面对产业转移带来的额外环境压力（王凯等，2021）^[50]。

表 4-9 区域异质性检验

变量	东部 Carbon	中部 Carbon	西部 Carbon	东部 So ₂	中部 So ₂	西部 So ₂
Dig	-0.002*** (-3.022)	-0.003* (-1.766)	-0.002 (-1.040)	-0.007*** (-3.155)	-0.004 (-1.471)	-0.004 (-1.243)
Popu	-0.099 (-0.588)	-0.359** (-2.240)	-0.392* (-1.839)	1.422*** (2.970)	-0.239 (-1.299)	-0.015 (-0.033)
Fdi	-0.025*** (-2.888)	-0.011 (-0.596)	-0.014 (-0.949)	-0.013 (-0.696)	-0.079* (-1.701)	-0.033 (-0.827)

续表 4-9 区域异质性检验

变量	东部 Carbon	中部 Carbon	西部 Carbon	东部 So ₂	中部 So ₂	西部 So ₂
Tele	-0.038 (-1.331)	0.028 (1.277)	-0.031 (-1.354)	0.079 (0.913)	-0.015 (-0.258)	-0.001 (-0.009)
Inds	-0.118*** (-3.447)	-0.087*** (-3.157)	-0.106*** (-2.937)	0.077 (0.749)	-0.138** (-1.995)	-0.187** (-2.405)
Budg	-0.006 (-1.565)	0.002 (0.462)	-0.001 (-0.166)	0.002 (0.211)	-0.031** (-2.340)	-0.031*** (-2.648)
Humc	-0.100** (-2.338)	-0.087 (-1.474)	-0.012 (-0.236)	-0.108 (-1.444)	-0.023 (-0.235)	0.181 (1.164)
Cona	-0.153*** (-5.510)	-0.261*** (-6.282)	-0.218** (-2.333)	0.121* (1.709)	-0.001 (-0.004)	-0.398*** (-3.916)
Area	0.171 (1.201)	0.061 (1.204)	-0.267 (-0.758)	0.565 (1.097)	-0.123** (-2.452)	-0.138 (-0.142)
Ener	0.202* (1.934)	0.178 (0.869)	0.012 (0.129)	0.096 (0.354)	1.417 (1.420)	0.228 (1.076)
常数项	3.033* (1.962)	5.713*** (6.536)	8.049*** (2.841)	-12.324** (-2.319)	5.019*** (3.908)	3.798 (0.449)
个体固定效应	是	是	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	1152	1188	972	1152	1188	972
R ²	0.949	0.927	0.932	0.846	0.843	0.836

4.7.2 城市类型异质性

本文根据《全国资源型城市可持续发展规划（2013—2020 年）》的名单，将地级市划分为资源型和非资源型城市分类进行回归，见表 4-10。结果显示，数字经济在资源型城市中对碳排放和污染排放具有显著的抑制作用，并且其在减少污染方面的效应超过了降低碳排放的效应；相比之下，对非资源型城市的抑制作用并不显著。其原因可能是，数字经济以数字技术为核心驱动力，有利于资源型城市吸收先进的绿色技术和管理经验，促进工业布局和生产模式优化，加速了资源型城市产业结构的绿色化转型（昌敦虎等，2023）^[90]；此外，数字技术的深入应用能够降低城市之间信息技术和知识交流的成本，推动智能化发展。特别是在锁定碳排放和污染排放源头以及预测预警方面的应用，数字技术发挥了其减污降碳的潜力。因此，数字经济为资源型城市带来了更大的发展红利，其减污降碳效果更为显著。

表 4-10 城市类型异质性

变量	资源型城市		非资源型城市	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
Dig	-0.004*** (-2.741)	-0.009*** (-2.984)	-0.002 (-1.436)	-0.002 (-1.191)
Popu	-0.418* (-1.975)	-0.258 (-1.093)	-0.112 (-0.735)	0.979** (2.410)
Fdi	-0.022* (-1.771)	-0.055* (-1.697)	-0.012 (-1.106)	-0.022 (-0.696)
Tele	-0.020 (-1.222)	0.035 (0.647)	0.006 (0.330)	0.011 (0.190)
Inds	-0.077*** (-2.900)	-0.136** (-2.106)	-0.099*** (-4.098)	-0.021 (-0.309)
Budg	0.001 (0.146)	-0.034*** (-3.031)	-0.004 (-0.945)	-0.019** (-2.162)
Humc	-0.074* (-1.790)	0.103 (1.169)	-0.091* (-1.779)	-0.169** (-2.009)
Cona	-0.263*** (-6.995)	-0.091 (-1.019)	-0.193*** (-4.062)	-0.072 (-0.872)
Area	0.279 (1.415)	0.024 (0.082)	0.012 (0.416)	-0.094 (-0.907)
Ener	0.200* (1.886)	0.387* (1.738)	0.0694 (0.899)	0.453 (1.167)
常数项	3.967*** (4.046)	2.836 (1.412)	4.436*** (3.976)	-0.846 (-0.346)
个体固定效应	是	是	是	是
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
N	1368	1368	1944	1944
R ²	0.922	0.828	0.941	0.832

4.7.3 门槛效应检验

由于数字经济对碳排放和污染排放的作用可能受到技术进步水平的门槛效应影响, 本文进一步采用技术进步水平作为门槛变量进行实证分析, 结果见表 4-11。结果显示技术进步水平对数字经济减污降碳存在单门槛效应, 门槛估计值分别为 0.1098 和 0.1506。数字经济对碳排放和污染排放的影响呈倒“U”型, 当技术进步水平大于门槛值时, 数字经济的发展能够显著促进城市减污降碳, 然而当技术进步水平小于门槛值时, 数字经济的发展反而与碳排放和污染排放正相关, 其可能的原因是, 当技术进步水平较低时, 企业往往属于迅速扩张和资本投入时期, 数字经济也处于成长阶段, 难以在追求发展的同时实现经济效益与环境保护

的平衡，导致未能有效推动碳减排和污染减排，本文假设 H7 成立。

表 4-11 门槛效应检验结果

变量	(1) Carbon	(2) So ₂
Dig(Tec≤Th1)	0.002** (2.075)	0.005** (2.021)
Dig(Tec>Th1)	-0.004*** (-6.353)	-0.017*** (-9.933)
Popu	-0.243*** (-4.746)	0.664*** (4.508)
Fdi	-0.017*** (-4.112)	-0.005 (-0.462)
Tele	-0.006 (-0.691)	0.297*** (11.178)
Inds	-0.080*** (-8.691)	0.302*** (11.454)
Budg	-0.002 (-1.187)	-0.020*** (-5.440)
Humc	-0.088*** (-5.531)	-0.762*** (-16.600)
Cona	-0.212*** (-16.339)	-0.439*** (-11.800)
Area	0.004 (0.097)	-0.053 (-0.455)
Ener	0.142*** (3.830)	-0.751*** (-7.066)
常数项	5.4203*** (12.595)	9.945*** (8.038)
个体固定效应	是	是
省份固定效应	是	是
年份固定效应	是	是
N	3312	3312
R ²	0.940	0.906

4.8 本章小结

本章首先利用基准回归模型对中国 276 个地级市数字经济与碳排放和污染排放的关系进行验证并进行稳健性检验、机制效应检验、异质性检验和门槛效应检验，研究结果表明，第一，数字经济能够显著降低城市碳排放和污染排放，促进城市绿色低碳发展；第二，技术进步水平在数字经济减污降碳作用中发挥了遮掩效应，城市绿化水平在数字经济减污降碳过程中发挥了中介作用，数字经济可

以通过提升城市绿化水平，间接降低城市碳排放和污染排放；第三，异质性分析表明，东部地区城市和资源型城市中，数字经济对碳排放和污染排放的抑制作用更为显著；第四，技术进步水平对数字经济的减污降碳效应存在门槛效应，当技术进步水平较低时，数字经济对碳排放和污染排放有促进作用；当技术进步水平较高时，数字经济对碳排放和污染排放有抑制作用。本章基于地级市面板数据分析了数字经济对绿色低碳发展的影响，并解释了作用机制，但未考虑区域间的空间交互作用，需要进一步构建空间计量模型进行分析。

第 5 章 数字经济赋能绿色低碳发展的空间效应分析

5.1 变量选取与数据说明

十八大以来,我国高度重视数字经济发展,先后出台了一系列促进大数据发展的重大战略举措,如网络强国、“互联网+”行动等,新技术、新产业、新业态、新模式层出不穷,成为拉动绿色经济增长的新引擎。为分析我国近年来数字经济发展与减污降碳的关联性特征,并考虑样本数据的可获得性,本文选取样本的起始时间为 2012 年,即时间跨度为 2012 年至 2023 年全国 31 个省份组成的省域面板数据,数字普惠金融数据取自于郭峰等(2020)^[91]构建的“北京大学数字普惠金融指数”,各省的绿色专利数据均来自于 CNRDS 数据库,其他数据均来源于《中国统计年鉴》及 Wind 数据库,部分缺失数据采用插值法补齐。

5.1.1 被解释变量

本章研究样本年限仍为 2012-2023 年,研究对象为全国 31 个省份组成的省域面板数据,被解释变量为各省份的碳排放(Carbon)和污染排放(So₂),测度方法与 4.1 节一致,即测度省域碳排放和污染排放水平,其与实际 GDP 的比值用来衡量各省份的碳排放强度和污染排放强度。

5.1.2 核心解释变量

核心解释变量为数字经济发展水平。参考李朋林和侯梦莹(2023)^[92]等相关研究,将数字产业化、产业数字化、传统基础设施和新型基础设施作为一级指标,选取电信业务总量、软件业务收入和技术市场成交额等 21 个变量作为二级指标,测算数字经济发展综合指数,反映数字经济发展水平,记为 Dig,见表 5-1:

本章运用客观赋权的熵值法对数字经济发展水平进行测算,其核心是通过各指标所提供的信息来计算各指标所占的权重,最终将指标按照权重加权得到相关指数。具体步骤如下:

以正向指标为例,首先,对各指标进行标准化处理:

$$X_{it} = \frac{y_{it} - \min(y_i)}{\max(y_i) - y_{it}} \quad (5-1)$$

式 (5-1) 中, X_{it} 为标准化处理后的数据, y_{it} 为原始数据, $\max(y_i)$, $\min(y_i)$ 分别为该指标数据的最大值和最小值。

其次, 计算 i 指标第 t 年所占比重 ω_{it} 、信息熵 e_i 以及信息熵的冗余度 d_i :

$$\omega_{it} = \frac{X_{it}}{\sum_{t=1}^m X_{it}} \quad (5-2)$$

$$e_i = \frac{-1}{\ln m} \sum_{t=1}^m \omega_{it} * \ln \omega_{it} \quad (5-3)$$

$$d_i = 1 - e_i \quad (5-4)$$

最后, 计算 i 个指标的权重 w_i 并对其进行加权即可得到数字经济综合指数:

$$w_i = \frac{d_i}{\sum_{i=1}^m d_i} \quad (5-5)$$

表 5-1 省域数字经济指标体系

一级指标	二级指标	属性
数字产业化	电信业务总量 (亿元)	+
	软件业务收入 (亿元)	+
	技术合同成交额 (亿元)	+
	信息传输、计算机服务和软件业从业人员 (万人)	+
产业数字化	规模以上工业企业 R&D 经费支出 (亿元)	+
	规模以上工业企业 R&D 人员折合全当时量 (人年)	+
	数字普惠金融指数	+
	有电子商务交易活动的企业数 (个)	+
	电子商务销售额 (亿元)	+
	企业每百人使用计算机数 (台)	+
	每百家企业拥有网站数 (个)	+
传统基础设施	互联网宽带接入端口 (万个)	+
	互联网宽带接入用户 (万户)	+
	网页数 (万个)	+
	邮政营业网点 (万个)	+
	域名数 (万个)	+
新型基础设施	长途光缆线路长度 (公里)	+
	移动电话交换机容量 (万户)	+
	移动电话普及率 (部/百人)	+
	移动电话基站 (万个)	+
	IPv4 地址数 (万个)	+

5.1.3 中介变量

本章从技术创新和技术扩散角度分析空间视角下，数字经济影响碳排放和污染排放的传导机制，以绿色创新水平和产业集聚水平作为中介变量。

我国专利法将专利分为三类：发明专利、实用新型专利以及外观设计专利，其中发明专利最能显著地反映一个地区的创新能力和创新水平。本文参考李青原和肖泽华（2020）^[93]的做法，采用 $\ln(1 + \text{各省当年绿色发明专利获得量})$ 来衡量绿色创新水平（Gren）。

产业集聚水平（Lq）可以有效反映一个地区的要素空间分布情况。参考张丽君等（2023）^[94]的研究，用制造业区位熵衡量产业集聚水平，具体计算步骤如下：

$$agg_t = \left(\frac{e_{ijt}}{\sum_i e_{ijt}} \right) / \left(\frac{\sum_j e_{ijt}}{\sum_i \sum_j e_{ijt}} \right) \quad (5-6)$$

其中， e_{ijt} 为 i 省 t 年制造业就业人数， $\sum_j e_{ijt}$ 为 i 省 t 年所有产业就业人数， $\sum_i e_{ijt}$ 为所有省 t 年制造业就业人口数， $\sum_i \sum_j e_{ijt}$ 为所有省 t 年所有产业就业人数。区位熵值越高，说明该省产业集聚水平越高，反之越低。

5.1.4 控制变量

为控制其他潜在因素对实证结果的影响，本文加入以下控制变量：产业结构（Inds），用第二产业与 GDP 的比值度量；人口规模（Popu），用户籍人口的对数度量；人力资本水平（Humc），用每万人大学生在校数度量；经济发展水平（Pgdp），用人均 GDP 度量；物质资本水平（Finv），用当年固定资产投资额度度量；交通运输（Tran），用人均货运量度量；城镇化水平（Urba），用 $\ln(\text{城镇常住人口}/\text{总人口})$ 度量；政府财政支持力度（Budg），用财政一般预算支出与 GDP 的比值度量；社会消费水平（Cona），用社会消费品零售总额与 GDP 的比值度量。

5.2 空间计量模型

5.2.1 模型设定

空间计量模型在传统面板模型的基础上考虑了空间因素，构建空间计量模型

如下：

$$\begin{aligned} Y_{it} &= \rho \sum_{j=1}^n W_{ij} Y_{jt} + \beta X_{it} + \theta \sum_{j=1}^n W_{ij} X_{jt} + \alpha_i + \xi_t + \mu_{it} \\ \mu_{it} &= \lambda \sum_{j=1}^n W_{ij} \mu_{jt} + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5-7)$$

其中 Y 表示因变量， X 表示解释变量， W 为空间权重矩阵， i 表示省份， j 表示邻近省份（ $i \neq j$ ）， t 表示年份， ρ 为被解释变量的空间自相关系数，用来衡量地区间碳排放和污染排放水平可能存在的空间相关性， ε_{it} 为独立的随机扰动项， β ， θ 为回归系数， α_i 和 ξ_t 分别为空间和时间固定效应系数， μ_{it} 表示空间误差项。当 $\lambda=0$ 时，模型为空间杜宾模型；当 $\lambda=0$ ， $\theta=0$ 时，模型为空间滞后模型；当 $\rho=0$ ， $\theta=0$ 时，该模型为空间误差模型（SEM）。

5.2.2 空间权重矩阵

1. 经济距离矩阵

基于两地区人均 GDP 之差绝对值的倒数构建经济距离矩阵，具体如下：

$$W = \begin{cases} \frac{1}{|Pgdp_i - Pgdp_j|} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5-8)$$

2. 地理距离矩阵

基于各省份的地理中心经纬度构建地理距离矩阵，具体如下：

$$W = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij}^2} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5-9)$$

其中 d_{ij} 表示两地区地理中心经纬度计算的球面距离， $Pgdp_i$ 与 $Pgdp_j$ 分别为 i 和 j 省份的人均 GDP 。

5.2.3 空间自相关性检验

通过计算被解释变量二氧化碳排放（Carbon）和污染排放（So₂）在地理距离矩阵和经济距离矩阵权重下的莫兰指数进行全局空间自相关检验，见表 5-2。

表 5-2 莫兰指数检验结果

年份	地理距离矩阵		经济距离矩阵	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
2012	0.034***	0.070***	0.050*	0.199***
2013	0.052***	0.073***	0.032*	0.238***
2014	0.058***	0.073***	0.008*	0.205***
2015	0.029***	0.075***	0.052*	0.131***
2016	0.016**	0.071***	0.075*	0.106***
2017	0.062***	0.051***	0.067*	0.073**
2018	0.058***	0.060***	0.078*	0.052**
2019	0.065***	0.080***	0.134***	0.070**
2020	0.053***	0.072***	0.114***	0.042*
2021	0.105***	0.034***	0.102***	0.017*
2022	0.091***	0.049***	0.111***	0.052*
2023	0.072***	0.043***	0.110***	0.062*

由表 5-2 可以看出,在两种空间权重矩阵下,二氧化碳排放(Carbon)和污染排放(So₂)莫兰指数均在 1%、5%和 10%水平下显著为正,数值介于 0.008~0.238,反映出我国省域碳排放和污染排放水平在空间分布上存在明显的正相关关系,二者均存在明显的空间集群现象,因此,实证分析中需要考虑空间效应的影响。

5.3 基准回归与空间计量模型的选择

首先固定省份和年份效应,对数字经济、碳排放和污染排放水平的关系分别进行面板模型 OLS 回归,见表 5-3,其中列(1)和列(2)为不加入控制变量的 OLS 估计结果,列(3)和列(4)为加入所有控制变量的 OLS 估计结果。由表 5-3 可以看出,数字经济在 1%水平下显著为负,反映出各省份的数字经济发展水平对碳排放和污染排放存在显著的抑制作用。

表 5-3 OLS 回归结果

	(1) Carbon	(2) So ₂	(3) Carbon	(4) So ₂
Dig	-7.331*** (-5.681)	-3.537*** (-4.448)	-4.053*** (-3.043)	-4.208*** (-5.616)
Inds			-0.270** (-2.358)	-0.096 (-1.390)
Popu			-4.640*** (-5.178)	0.019 (0.035)
Humc			-36.382** (-2.106)	-85.525*** (-8.189)
Pgdp			-0.082*** (-2.722)	-0.120*** (-6.547)

续表 5-3 OLS 回归结果

	(1) Carbon	(2) So ₂	(3) Carbon	(4) So ₂
Finv			-0.005 (-0.040)	-0.006 (-0.076)
Tran			-0.164 (-0.901)	0.090 (0.819)
Urba			1.241* (1.773)	-1.272*** (-3.005)
Budg			-0.122 (-0.201)	-0.264 (-0.720)
Cona			0.018 (0.712)	0.007 (0.443)
常数项	4.552*** (10.395)	1.370*** (5.079)	43.393*** (6.449)	3.057 (0.751)
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
N	372	372	372	372
R ²	0.872	0.895	0.897	0.919

进一步,参考向宇和代沁雯(2022)^[95],采用 LM 检验来分析空间滞后模型(SLM)、空间误差模型(SEM)和空间杜宾模型(SDM)的适用性,从表 5-4 可知两种空间权重矩阵下,LM-lag、LM-error、RLM-lag 和 RLM-error 均通过了 1%的显著性检验,说明面板数据存在空间相关性,选用空间杜宾模型(SDM)。进一步,结合 Wald 检验和 LR 检验可以看出,Wald 检验在两种权重矩阵下均显著,说明 SDM 模型不会退化为 SLM 和 SEM 模型,LR 检验结果与 Wald 检验结果一致。Hausman 检验结果显示两种权重矩阵下,结果均在 1%的水平下显著,说明最优模型为固定效应的空间杜宾(SDM)模型。

表 5-4 LM、Wald 和 LR 检验结果

检验统计量	地理距离矩阵		经济距离矩阵	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
LM (error) test	2.915***	8.058***	4.764***	11.496***
Robust LM (error) test	2.928***	14.702***	10.861***	20.020**
LM (lag) test	9.718***	7.428**	6.182***	12.669**
Robust LM (lag) test	9.730***	18.376***	8.930***	23.461***
Wald spatial lag	16.590***	60.790***	41.071***	72.140***
Wald spatial error	15.630**	57.055***	38.880***	76.620***
LR spatial lag	46.650***	46.780***	33.820***	47.360***
LR spatial error	40.400***	46.550***	29.260***	41.140***
Hausman test	65.910***	51.720***	43.221***	37.723***

5.4 数字经济对绿色低碳发展影响的实证分析

5.4.1 空间计量模型回归结果分析

表 5-5 分别给出了两种权重下数字经济对碳排放和污染排放影响的时间和个体双固定效应空间计量模型的回归结果，在两种空间权重矩阵下，核心解释变量的系数均在 1% 的水平下显著为负，说明数字经济可以促进减污降碳。控制变量方面，人力资本水平（Humc）和经济发展水平（Pgdp）的系数在两种空间权重矩阵下均显著为负，说明促进教育事业的发展以及提升经济发展水平对减污降碳具有显著的促进作用。

地理距离矩阵和经济距离矩阵下，数字经济空间滞后项（ $W \times Dig$ ）均显著为负，说明数字经济发展水平存在明显的空间传导效应，经济联系紧密的邻近城市的数字经济的发展会促进本地区减污降碳，其原因可能在于，对于经济联系紧密的省份而言，由于在产业结构、能源使用和经济增长模式上具有相似性，为构建数字化信息共享和数字创新资源的协作平台提供了便利。信息化协作共享不仅能够促进数字化项目联合实施，还有利于推动数据要素的跨区流动，推动资源配置优化，有效促进减污降碳（徐军委等，2024）^[96]。

表 5-5 固定效应空间计量模型回归结果

变量	地理距离矩阵		经济距离矩阵	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
Dig	-5.183*** (-4.209)	-2.284*** (-3.054)	-5.184*** (-4.159)	-2.387*** (-3.229)
Inds	-0.446*** (-3.556)	0.020 (0.264)	-0.515*** (-3.888)	-0.024 (-0.301)
Popu	-6.097*** (-6.565)	0.469 (0.833)	-6.347*** (-6.720)	0.433 (0.774)
Humc	-59.736*** (-3.472)	-84.288*** (-8.064)	-58.918*** (-3.492)	-82.790*** (-8.219)
Pgdp	-0.117*** (-3.913)	-0.149*** (-8.230)	-0.102*** (-3.670)	-0.122*** (-7.369)
Finv	0.119 (0.884)	0.044 (0.544)	-0.106 (-0.952)	-0.025 (-0.369)
Tran	0.051 (0.290)	0.068 (0.643)	0.060 (0.340)	0.002 (0.019)
Urba	2.435*** (3.697)	-1.133*** (-2.828)	1.237* (1.943)	-1.349*** (-3.555)

续表 5-5 固定效应空间计量模型回归结果

变量	地理距离矩阵		经济距离矩阵	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
Budg	-1.264* (-1.947)	-0.454 (-1.152)	-0.027 (-0.049)	-0.222 (-0.688)
Cona	0.045** (1.961)	-0.011 (-0.824)	0.027 (1.182)	0.012 (0.884)
W×Dig	-18.704** (-2.017)	-9.227* (-1.654)	-13.080*** (-2.874)	-4.592* (-1.695)
W×Inds	-1.668* (-1.682)	1.326** (2.200)	-0.736* (-1.725)	0.297 (1.178)
W×Popu	-19.737*** (-2.736)	-9.308** (-2.184)	-10.138*** (-2.927)	1.342 (0.672)
W×Humc	-170.289 (-1.201)	-37.100 (-0.424)	-158.211** (-2.069)	-97.774** (-2.158)
W×Pgdp	-0.259 (-1.230)	-0.247* (-1.924)	0.061 (0.660)	-0.058 (-1.027)
W×Finv	1.970* (1.724)	-0.477 (-0.691)	-0.570 (-1.295)	-0.236 (-0.901)
W×Tran	0.255 (0.198)	-2.022*** (-2.590)	1.356** (2.338)	-1.286*** (-3.747)
W×Urba	25.707*** (4.543)	-4.008 (-1.155)	1.056 (0.507)	-3.016** (-2.427)
W×Budg	-16.039*** (-2.872)	0.383 (0.113)	4.690** (2.536)	0.997 (0.904)
W×Cona	0.454*** (3.194)	-0.111 (-1.287)	0.122* (1.654)	0.046 (1.045)
省份固定效应	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是
N	372	372	372	372
R ²	0.643	0.677	0.527	0.615

5.4.2 空间溢出效应分解

尽管上述分析显示数字经济水平的提高可以促进区域减污降碳,但是由于存在空间溢出效应,以上空间杜宾模型中数字经济的系数并不能代表其对碳排放和污染排放水平的边际影响,为此,本节基于碳排放和污染排放水平的空间特征,分别在地理距离矩阵和经济距离矩阵下利用空间杜宾模型定量分析 2012-2023 年数字经济对碳排放和污染排放的总体效应及其分解效应。表 5-6 和表 5-7 分别给出了在地理距离矩阵和经济距离矩阵下数字经济对碳排放和污染排放的直接效应、间接效应和总体效应的 SDM 回归结果。

表 5-6 地理距离矩阵下空间溢出效应分解结果

变量	Carbon			So ₂		
	直接效应	间接效应	总体效应	直接效应	间接效应	总体效应
Dig	-4.662*** (-3.827)	-7.836* (-1.595)	-12.497** (-2.440)	-2.048*** (-2.782)	-4.787* (-1.422)	-6.835** (-1.935)
Inds	-0.411*** (-3.677)	-0.673 (-1.248)	-1.085* (-1.890)	-0.020 (-0.299)	0.822** (2.252)	0.801** (2.061)
Popu	-5.536*** (-6.194)	-7.848** (-1.968)	-13.383*** (-3.337)	0.785 (1.456)	-6.006** (-2.239)	-5.220* (-1.907)
Humc	-56.048*** (-3.501)	-61.418 (-0.782)	-117.467 (-1.426)	-84.987*** (-8.793)	16.732 (0.320)	-68.255 (-1.237)
Pgdp	-0.111*** (-4.006)	-0.082 (-0.729)	-0.193 (-1.622)	-0.145*** (-8.583)	-0.086 (-1.095)	-0.231*** (-2.763)
Finv	0.055 (0.463)	1.039* (1.646)	1.094 (1.621)	0.059 (0.813)	-0.296 (-0.704)	-0.238 (-0.527)
Tran	0.032 (0.184)	0.187 (0.270)	0.219 (0.303)	0.118 (1.117)	-1.229** (-2.527)	-1.110** (-2.164)
Urba	1.655** (2.426)	12.853*** (3.686)	14.508*** (4.137)	-1.036*** (-2.582)	-2.024 (-0.947)	-3.060 (-1.427)
Budg	-0.727 (-1.258)	-8.198*** (-2.596)	-8.925*** (-2.655)	-0.456 (-1.318)	0.440 (0.216)	-0.017 (-0.008)
Cona	0.032 (1.424)	0.230*** (2.826)	0.262*** (3.157)	-0.008 (-0.578)	-0.062 (-1.139)	-0.070 (-1.242)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	372	372	372	372	372	372

从直接效应来看,在两种空间权重矩阵下,数字经济对碳排放和污染排放的直接效应均显著为负,说明提高数字经济发展水平有助于本地区减污降碳,数字技术如大数据分析和云计算能够提升能源的配置和利用效率,减少能源浪费,数字经济的发展推动产业结构的优化升级,促进新兴绿色产业的发展,从而降低与能源消耗直接相关的碳排放和污染排放,此外,数字经济的发展改善了生产方式,有效提升了生产要素的调配和利用效率,从而降低总体的碳排放水平。从间接效应来看,两种空间权重矩阵下,数字经济对碳排放和污染排放的间接效应显著为负,反映出数字经济的发展不仅影响本地区,还通过经济外部性影响其他地区。当两个地区地理距离和经济水平相近时,本地区的数字经济发展水平的提高会显著抑制其他地区的碳排放和污染排放,其原因可能是,数字经济的发展通常会带动产业结构向更加环保和效率更高的方向调整,促使周边地区向更加清洁高效的产业模式转变,以此降低污染排放。同时,一个地区的数字经济发展可能会激发

周边地区在可持续发展方面的竞争意识，推动其实施减少碳足迹和污染的措施，以维持竞争力。此外，数字经济的发展还可能增加市场对环境友好型产品和服务的需求，这种需求的增长可能改变邻近地区的生产与消费行为，进一步促进碳排放和污染排放的减少。

表 5-7 经济距离矩阵下空间溢出效应分解结果

变量	Carbon			So ₂		
	直接效应	间接效应	总体效应	直接效应	间接效应	总体效应
Dig	-4.638*** (-3.736)	-8.396** (-2.488)	-13.034*** (-3.524)	-2.225*** (-3.000)	-3.119* (-1.487)	-5.343** (-2.292)
Inds	-0.498*** (-4.076)	-0.386 (-1.251)	-0.884** (-2.428)	-0.039 (-0.530)	0.253 (1.284)	0.214 (0.923)
Popu	-5.922*** (-6.806)	-5.795** (-2.354)	-11.717*** (-4.289)	0.434 (0.835)	0.919 (0.614)	1.353 (0.805)
Humc	-52.592*** (-3.187)	-10.306* (-1.781)	-15.898*** (-2.587)	-80.216*** (-8.184)	-56.566 (-1.559)	-16.782*** (-3.557)
Pgdp	-0.106*** (-3.899)	0.076 (1.117)	-0.030 (-0.415)	-0.121*** (-7.475)	-0.016 (-0.377)	-0.137*** (-2.971)
Finv	-0.081 (-0.732)	-0.384 (-1.115)	-0.465 (-1.348)	-0.016 (-0.238)	-0.172 (-0.798)	-0.188 (-0.853)
Tran	-0.013 (-0.071)	1.050** (2.533)	1.038** (2.306)	0.042 (0.396)	-1.005*** (-3.732)	-0.963*** (-3.239)
Urba	1.216* (1.918)	0.377 (0.233)	1.593 (0.981)	-1.253*** (-3.347)	-2.097** (-2.015)	-3.350*** (-3.149)
Budg	-0.212 (-0.391)	3.498** (2.390)	3.287** (2.341)	-0.240 (-0.751)	0.817 (0.887)	0.577 (0.638)
Cona	0.023 (1.033)	0.085 (1.540)	0.109* (1.831)	0.011 (0.851)	0.034 (0.982)	0.046 (1.206)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	372	372	372	372	372	372

5.5 稳健性检验

本章采用了三种方法进行稳健性检验。第一种方法是对本文变量进行 1%和 99%的缩尾处理，结果见表 5-8 第 2-5 列，数字经济（Dig）的系数在 1%的水平上显著为负，与前文结论基本一致。

第二种方法是更换空间权重矩阵，为综合考虑经济因素和地理因素对数字经济对碳排放和污染排放的影响，本文参考（刘满凤和王帅龙，2017）^[97]构建同时包括经济因素和地理因素的经济地理嵌套矩阵进行稳健性检验，具体如下：

$$W = \begin{cases} \frac{1}{|Pgdp_i - Pgdp_j|} \times \frac{1}{d_{ij}^2} & i \neq j \\ 0 & i = j \end{cases} \quad (5-10)$$

检验结果见表 5-8 第 6-7 列，结果显示，在经济地理嵌套矩阵下，数字经济对碳排放和污染排放仍为显著的抑制作用，本文主要结论依然成立。

表 5-8 稳健性检验

变量	缩尾处理				更换空间权重矩阵	
	地理距离矩阵		经济距离矩阵		经济地理嵌套矩阵	
	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂	Carbon	So ₂
Dig	-6.003*** (-4.922)	-2.266*** (-3.513)	-5.691*** (-4.538)	-2.445*** (-3.948)	-5.031*** (-3.813)	-1.841** (-2.307)
Inds	-0.274** (-2.112)	0.041 (0.593)	-0.413*** (-2.976)	0.126* (1.827)	-0.337** (-2.551)	-0.034 (-0.424)
Popu	-6.000*** (-6.096)	0.544 (1.047)	-5.688*** (-5.730)	1.291*** (2.627)	-4.939*** (-5.336)	-0.177 (-0.315)
Humc	-44.691*** (-2.648)	-47.398*** (-5.311)	-25.994 (-1.541)	-46.182*** (-5.520)	-50.617** (-2.492)	-88.179*** (-7.163)
Pgdp	-0.071** (-2.336)	-0.109*** (-6.811)	-0.062** (-2.102)	-0.074*** (-5.070)	-0.082** (-2.567)	-0.135*** (-6.983)
Finv	0.120 (0.888)	-0.034 (-0.486)	-0.177 (-1.598)	-0.053 (-0.963)	-0.060 (-0.502)	-0.033 (-0.451)
Tran	0.087 (0.452)	0.299*** (2.929)	0.094 (0.513)	0.123 (1.336)	-0.057 (-0.322)	0.135 (1.265)
Urba	2.603*** (3.258)	-0.306 (-0.724)	1.245 (1.571)	-0.091 (-0.232)	1.161 (1.536)	-1.466*** (-3.200)
Budg	-0.925 (-1.498)	-0.441 (-1.349)	-0.012 (-0.021)	-0.254 (-0.942)	0.025 (0.047)	-0.165 (-0.512)
Cona	0.037 (1.481)	-0.016 (-1.213)	0.027 (1.065)	-0.008 (-0.627)	0.032 (1.264)	-0.013 (-0.847)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	372	372	372	372	372	372
R ²	0.655	0.638	0.521	0.844	0.562	0.551

第三种方法是工具变量法。考虑到数字经济与碳排放和污染排放存在反向因果关系，即模型存在内生性问题。借鉴黄群慧等（2019）^[89]的研究思路，采用上一年度各省的互联网宽带接入端口与 1984 年每万人固定电话数量的自然对数交乘项作为工具变量（Iv）进行二阶段最小二乘法回归。表 5-9 列（1）第一阶段工具变量（Iv）对解释变量（Dig）的回归结果显示，工具变量与数字经济之间的关系显著为正，满足工具变量相关性的要求，第（2）和（3）列结果显示，

Kleibergen–Paap rk Wald F 统计量的值在 10%显著性水平上高于临界值，内生性检验的 P 值小于 0.05，说明工具变量有效，具有解释力。第二阶段的回归结果显示，解释变量（Dig）的系数分别在 1%和 10%的水平上显著为负，说明在引入工具变量减轻内生性问题的影响后，本文主要结论依然成立。综上可述，研究结论具有稳健性。

表 5-9 内生性检验

变量	第一阶段	第二阶段	
	(1) Dig	(2) Carbon	(3) So ₂
Dig		-13.122*** (-2.750)	-3.686* (-1.792)
Iv	0.035*** (4.930)		
Kleibergen–Paap rk Wald F 统计量		24.322	24.322
Endogeneity test （P 值）		0.011	0.017
Inds	0.018* (2.119)	0.382* (1.937)	-0.195*** (-3.119)
Popu	-0.086 (-1.430)	-1.771 (-0.973)	-0.190 (-0.241)
Humc	1.590* (1.831)	-22.164 (-0.470)	-70.730*** (-3.455)
Pgdp	0.004* (1.816)	-0.099 (-1.622)	-0.073*** (-3.167)
Finv	0.006 (0.618)	0.107 (0.573)	-0.190** (-2.200)
Tran	-0.025** (-2.411)	-0.510 (-1.263)	0.032 (0.172)
Urba	-0.115** (-2.587)	-1.465 (-1.193)	-0.780 (-1.264)
Budg	0.086*** (3.726)	-0.132 (-0.166)	-0.217 (-0.613)
Cona	0.001 (0.653)	-0.050* (-2.014)	-0.011 (-0.707)
个体固定效应	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
N	372	372	372
R ²	0.568	0.113	0.314

5.6 机制效应检验

为厘清数字经济对碳排放和污染排放的影响机制，分别检验绿色技术创新水

平和产业集聚水平是否在数字经济对碳排放和污染排放的影响中起到中介作用，研究结果见表 5-10 和表 5-11。

表 5-10 机制检验结果（Gren）

变量	地理距离矩阵			经济距离矩阵		
	Gren	Carbon	So ₂	Gren	Carbon	So ₂
Dig	10.509*** (8.276)	-3.744*** (-2.840)	-1.850** (-2.278)	12.159*** (9.269)	-3.063** (-2.244)	-1.911** (-2.280)
Gren		-0.130*** (-2.592)	-0.145*** (-4.697)		-0.169*** (-3.469)	-0.121*** (-4.036)
Inds	-0.420*** (-3.229)	-0.460*** (-3.621)	0.017 (0.219)	-0.304** (-2.185)	-0.568*** (-4.332)	0.024 (0.296)
Popu	0.458 (0.474)	-6.409*** (-6.881)	1.270** (2.207)	0.310 (0.314)	-6.278*** (-6.750)	1.060* (1.860)
Humc	29.751* (1.670)	-60.302*** (-3.523)	-83.713*** (-7.885)	10.632 (0.599)	-57.541*** (-3.457)	-90.366*** (-8.805)
Pgdp	0.090*** (2.922)	-0.104*** (-3.515)	-0.149*** (-8.166)	0.034 (1.157)	-0.095*** (-3.465)	-0.124*** (-7.340)
Finv	0.127 (0.919)	0.130 (0.983)	0.106 (1.300)	0.138 (1.168)	-0.087 (-0.786)	0.045 (0.656)
Tran	0.354* (1.958)	0.146 (0.844)	0.114 (1.060)	0.613*** (3.342)	0.160 (0.912)	0.042 (0.387)
Urba	0.117 (0.172)	2.415*** (3.737)	-0.868** (-2.174)	0.476 (0.710)	1.322** (2.109)	-1.046*** (-2.705)
Budg	0.068 (0.102)	-1.174* (-1.840)	-0.434 (-1.101)	0.189 (0.331)	-0.006 (-0.010)	-0.089 (-0.270)
Cona	-0.023 (-0.995)	0.044* (1.954)	-0.026* (-1.897)	-0.037 (-1.515)	0.021 (0.939)	-0.003 (-0.214)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	372	372	372	372	372	372
R ²	0.626	0.642	0.688	0.628	0.508	0.603

首先检验数字经济对绿色技术创新水平的影响，结果显示在两种空间权重矩阵下，数字经济对绿色技术创新水平均有显著的正向促进作用，加入中介变量后，数字经济（Dig）的系数依然显著为负，但相较不加中介变量的系数绝对值减小，表明在数字经济对碳排放和污染排放的影响过程中，绿色技术创新起到部分中介作用，即在数字经济促进减污降碳过程中，部分是由绿色技术创新产生的促进作用，数字经济推动了可再生和清洁能源技术以及环保技术的广泛应用，提升资源使用效率，这些技术有助于降低能源消耗及环境污染。其次检验数字经济对产业集聚水平的影响，在两种空间权重矩阵下，数字经济对产业集聚水平的系数在

1%水平下显著为正，说明数字经济可以促进产业集聚，同时在加入产业集聚水平后，数字经济（Dig）系数绝对值减小，说明产业集聚水平在数字经济影响碳排放和污染排放的过程中起到中介作用，反映出数字经济可以促进数字产业与传统产业融合，降低匹配成本，有助于传统产业结构升级，提高产业集聚程度和区域经济绿色发展效率，对促进减污降碳起着重要作用，本文假设 H5 和 H6 成立。

表 5-11 机制检验结果（Lq）

变量	地理距离矩阵			经济距离矩阵		
	Lq	Carbon	So ₂	Lq	Carbon	So ₂
Dig	1.784*** (4.496)	-4.623*** (-3.648)	-2.086*** (-3.268)	1.759*** (4.386)	-4.637*** (-3.649)	-2.137*** (-4.018)
Lq		-0.337** (-2.087)	-0.248** (-2.432)		-0.325** (-2.008)	-0.218** (-2.180)
Inds	-0.220*** (-5.454)	-0.517*** (-3.959)	0.035 (0.422)	-0.137*** (-3.207)	-0.560*** (-4.188)	0.038 (0.461)
Popu	-0.163 (-0.547)	-6.162*** (-6.711)	0.841 (1.464)	0.045 (0.147)	-6.347*** (-6.755)	0.997* (1.731)
Humc	-15.006*** (-2.714)	-64.763*** (-3.767)	-93.906*** (-8.722)	-8.535 (-1.570)	-61.600*** (-3.659)	-92.905*** (-8.940)
Pgdp	0.008 (0.831)	-0.115*** (-3.846)	-0.153*** (-8.175)	0.002 (0.223)	-0.100*** (-3.605)	-0.125*** (-7.278)
Finv	-0.039 (-0.902)	0.112 (0.833)	0.042 (0.500)	0.008 (0.223)	-0.105 (-0.943)	0.030 (0.432)
Tran	-0.032 (-0.565)	0.038 (0.223)	0.113 (1.050)	0.010 (0.168)	0.074 (0.416)	0.001 (0.010)
Urba	-0.164 (-0.775)	2.387*** (3.663)	-0.918** (-2.250)	-0.105 (-0.510)	1.225* (1.924)	-1.067*** (-2.720)
Budg	-0.205 (-0.986)	-1.341** (-2.087)	-0.441 (-1.096)	0.208 (1.191)	0.043 (0.079)	-0.051 (-0.154)
Cona	-0.009 (-1.203)	0.043* (1.873)	-0.026* (-1.827)	-0.012* (-1.687)	0.023 (1.021)	-0.000 (-0.032)
省份固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
N	372	372	372	372	372	372
R ²	0.626	0.642	0.688	0.628	0.508	0.603

5.7 本章小结

本章在第 4 章的基础上，进一步探讨数字经济在省级层面是否具有减污降碳效应，分析其空间溢出效应，并厘清其作用机制，基于 2012-2023 年我国 31 个省份的面板数据，运用熵值法从数字产业化、传统基础设施、产业数字化以及新

型基础设施四个维度构建数字经济指标测量体系。在实证研究中,采用时间和个体双固定效应的空间杜宾模型(SDM)探讨了数字经济对碳排放和污染排放的影响,并进行了稳健性检验;进一步,从绿色创新和产业集聚视角,运用中介效应模型分析了数字经济对碳排放和污染排放的影响机制。研究表明:(1)各省份碳排放和污染排放水平之间存在明显的空间相关性,即本地区的碳排放和污染排放会受到其他地区的影响;(2)数字经济对本地区碳排放和污染排放具有显著的负向抑制作用,且存在空间溢出效应,具体而言,在地理和经济距离矩阵下,数字经济对周边地区的碳排放和污染排放水平存在负向空间溢出效应,即本地区数字经济的发展有利于周边地区的减污降碳;(3)数字经济可以通过促进绿色技术水平的提升从而提高资源使用效率,降低能源消耗,通过促进产业集聚来优化产业结构,进而提高区域经济绿色发展效率,间接促进减污降碳。

第 6 章 结论与政策建议

6.1 结论

促进经济社会发展向绿色、低碳方向转型是实现高质量发展的关键环节，而数字经济正是驱动绿色低碳发展的重要举措。本文基于碳排放和污染排放视角，从理论上分析了数字经济影响城市绿色低碳发展的内在机理，基于 2012-2023 年我国 276 个地级市的面板数据，构建特征词图谱，结合 Python 软件，测度了城市数字经济发展水平，检验了数字经济对城市减污降碳的影响及作用机制。进一步，在空间视角下，本文基于 2012-2023 年我国 31 个省份的面板数据，运用熵值法从数字产业化、产业数字化、传统基础设施以及新型基础设施四个维度构建数字经济指标评价体系。在实证研究中，采用时间和个体双固定效应的空间杜宾模型（SDM）分别在地理距离矩阵和经济距离矩阵下探讨了数字经济对碳排放和污染排放的影响以及传导机制。本文主要结论如下：

第一，固定个体、省份和年份的基准回归结果表明，数字经济对碳排放和污染排放的回归系数均在 1% 的水平上显著为负，说明数字经济能够显著降低城市碳排放和污染排放，促进城市绿色低碳发展，且这一结论经过一系列稳健性检验后依旧成立。异质性分析表明，东部地区城市和资源型城市中，数字经济对碳排放和污染排放的抑制作用更为显著。由此可见，数字经济可以促进城市绿色低碳发展，且对于不同城市的减污降碳效果有所差异。

第二，新质生产力作为实现绿色低碳发展的关键路径，技术进步水平在数字经济减污降碳作用中具有遮掩效应。城市绿化水平在数字经济减污降碳过程中发挥了中介作用，数字经济可以通过提升城市绿化水平，间接降低城市碳排放和污染排放。技术进步水平对数字经济的减污降碳效应存在门槛效应，当技术进步水平较低时，数字经济对碳排放和污染排放有促进作用；当技术进步水平较高时，数字经济对碳排放和污染排放有抑制作用。

第三，各省份碳排放和污染排放水平之间存在明显的空间相关性，即本地区的碳排放和污染排放会受到其他地区的影响。数字经济对本地区碳排放和污染排放具有显著的负向抑制作用，且存在空间溢出效应，具体而言，在地理和经济距离矩阵下，数字经济对周边地区的碳排放和污染排放水平存在空间溢出效应，即

本地区数字经济的发展有利于促进周边地区的减污降碳。因此，在发展数字经济的过程中，需要考虑其溢出效应。

第四，空间视角下，绿色技术水平和产业集聚水平在数字经济减污降碳过程中发挥了中介作用，数字经济可以通过促进绿色技术水平的提升推动可再生和清洁能源技术以及环保技术的广泛应用，从而提高资源使用效率，降低能源消耗，间接促进减污降碳；数字经济可以通过促进数字产业与传统产业融合，降低匹配成本从而优化传统产业结构，进而提高区域经济绿色发展效率，间接促进减污降碳，促进区域绿色低碳发展。

6.2 政策建议

根据本文的理论探讨和实证分析结果，数字经济促进了碳减排和污染减排，为城市的绿色低碳发展提供了动力。基于以上分析，本文提出以下政策建议：

第一，促进数字经济的持续与绿色发展。数字经济作为全球科技革命和产业创新发展的前沿，是推动社会经济转型的关键力量，尤其在减污降碳方面发挥重要作用。拓展数字经济在各个领域的使用范围和使用深度，充分利用人工智能、大数据、云计算等数字技术，加强数字技术在基础设施领域、医疗保健领域、教育领域以及商业经济领域等方面的应用，加快建设数字中国，推动经济绿色低碳发展，为经济社会可持续发展提供坚实的数字支撑。政府与企业需将节能减排的方针整合到其商业策略与管理流程中，利用数字化升级来改善资源分配，增强能源利用效率，降低资源损耗，并激励环保技术的进步。

第二，加强区域协调度及发展的联动性。数字经济产业发展过程中，应当充分把握空间溢出规律，最大限度的利用数字经济对周边邻近区域减污降碳的促进作用。一方面，促进区域协调发展，缩小区域间经济发展差距，加快构建现代化数字经济体系，引导数据要素资源在区域间流动；另一方面，促进区域间协作，共享污染减排和碳减排的实践经验及成就。构建区域性的环境治理和防控体系，协力应对区域性环境挑战。同时，要加大科技创新和绿色投入，提升技术进步及城市绿化水平，强化公共平台与产业化生态系统的构建，加速数字人才体系与培养规划的完善，系统化地推动技术的研发与实际应用。

第三，制定差异化的减污降碳策略。根据各地区的经济发展水平、产业结构、资源禀赋和环境承载能力，因地制宜，制定符合地区实际的减污降碳策略。一方

面，东部地区应利用其区位、技术和产业优势，引领城市产业实现创新性突破，同时与中西部地区的资源和成本优势相融合，优化数字产业生态，缩小数字发展差距，促进数字基础设施的均衡布局。另一方面，资源型城市应进一步巩固和提升数字经济带来的经济效益，充分发挥创新性降碳、规模性减碳和清洁性排碳的关键作用。非资源型城市则需增加科技创新研发投入，推动大数据、人工智能等数字技术与节能环保等产业的深度融合，提升其数字经济在减污降碳方面的能力。

第四，制定并执行更严格的碳排放和污染排放标准，发展新质生产力，加快发展方式绿色转型。聚焦新一代信息技术、新能源、新材料等前沿领域，加速培育经济新增长点，并力争在新兴领域实现突破性进展。加速传统产业的技术改造和升级，鼓励其向智能化、绿色化和高端化方向转型，以实现可持续发展。运用数字技术提升环境监管的效率与精确性，例如通过遥感监测和大数据分析实时跟踪碳排放与污染排放。利用数字平台推进环保教育工作以及信息的传播扩散，提升公众参与环保行动的积极性，倡导低碳生活方式，激发绿色消费行为模式的形成与推广，从而有力推动区域绿色低碳化发展进程。

参考文献

- [1] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, 2020(5): 23-41.
- [2] 许金红, 钟若愚. 数字经济对我国低碳经济转型的影响——基于空间效应视角[J]. 商业经济研究, 2023, 42(18): 124-127.
- [3] 张坤民. 低碳世界中的中国: 地位、挑战与战略[J]. 中国人口·资源与环境, 2008(3): 1-7.
- [4] Tapscott D. The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence[M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [5] 李长江. 关于数字经济内涵的初步探讨[J]. 电子政务, 2017(9): 84-92.
- [6] 魏江, 刘嘉玲, 刘洋. 数字经济学: 内涵、理论基础与重要研究议题[J]. 科技进步与对策, 2021, 38(21): 1-7.
- [7] 陈晓红, 李杨扬, 宋丽洁, 汪阳洁. 数字经济理论体系与研究展望[J]. 管理世界, 2022, 38(2): 208-224+13-16.
- [8] Rochet J C, Tirole J. Platform Competition in Two-sided Markets[J]. Journal of the European Economic Association, 2003, 1(4): 990-1029.
- [9] Bukht R, Heeks R. Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy[J]. International Organisations Research Journal, 2017, 13(2): 143-172.
- [10] 方颖, 余兴锦. 数字经济测度: 地区、行业与企业层面的视角[J]. 中国管理科学, 2025, 33(1): 124-139.
- [11] 范合君, 吴婷. 中国数字化程度测度与指标体系构建[J]. 首都经济贸易大学学报, 2020, 22(4): 3-12.
- [12] 陈梦根, 张鑫. 中国数字经济规模测度与生产率分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(1): 3-27.
- [13] 徐慧琳, 杨望, 谭小芬. 数字经济对共同富裕的影响——基于省级面板数据的实证[J]. 统计与决策, 2023, 39(19): 5-10.
- [14] 赵宸宇, 王文春, 李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. 财贸经济, 2021, 42(7): 114-129.

- [15]吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 任晓怡. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据[J]. 管理世界, 2021, 37(7): 130-144+10.
- [16]Hua Y B. Assessing Financial Inclusion Co-movement with Low-carbon Development Index: Implications for Regional Development[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2023, 30(47): 104791-104804.
- [17]Acheampong A O, Boateng E B. Modelling Carbon Emission Intensity: Application of Artificial Neural Network[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225: 833-856.
- [18]Tan R J, Zhou Z Y. Research on the Impact of Green Investment on Low-Carbon Economic Development: Based on the Test of Spatial Spillover Effect[J]. Sustainability, 2025, 17(5): 2185-2185.
- [19]Zhou H M, Xu L, Zhou P, et al. Coordination between Economic Growth and Carbon Emissions: Evidence from 178 Cities in China[J]. Economic Analysis and Policy, 2024, 81: 164-180.
- [20]黄永春, 黄瑜珊, 胡世亮, 贾琳. 数字金融能否助推绿色低碳发展?[J]. 南京财经大学学报, 2022(4): 88-97.
- [21]吴英姿, 闻岳春. 绿色生产率及其对工业低碳发展的影响研究[J]. 管理科学, 2013, 26(1): 112-120.
- [22]梁琳, 林善浪. 金融结构与经济绿色低碳发展[J]. 经济问题探索, 2018(11): 179-190.
- [23]张荣博, 钟昌标. 智慧城市试点、污染就近转移与绿色低碳发展——来自中国县域的新证据[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(4): 91-104.
- [24]Ding G, Su X Y, Wang R, et al. Measurement Research on the Influence of China's Provincial Technological Innovation Capacity upon Green Economy Development[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2022, 27(5): 747-757.
- [25]费威, 于宝鑫, 王维国. 数字经济发展与碳减排——理论推演与实证检验[J]. 经济学家, 2022(11): 74-83.
- [26]杨洁, 石依婷. 数字经济改善了区域碳排放水平吗? ——基于减排和增效两个视角[J]. 武汉金融, 2023(5): 51-58+20.

- [27]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(2): 68-78.
- [28]喻春娇, 唐威. 工业企业数字化转型能否促进碳减排——基于中国 A 股上市
工业企业的证据[J]. 宏观经济研究, 2023(7): 97-110+127.
- [29]田华文. “双碳”目标下数字经济赋能绿色低碳发展论析[J]. 中州学刊,
2023(9): 30-39.
- [30]兰梓睿. 低碳城市建设对区域绿色发展效率的异质性影响研究[J]. 现代经济
探讨, 2021(6): 101-110.
- [31]刘潭, 徐璋勇. 数字经济, 异质性技术创新与二氧化碳排放[J]. 科技进步与对
策, 2023(13): 1-10.
- [32]Liu Y X, Lei P, He D Y. Endogenous Green Technology Progress, Green
Transition and Carbon Emissions[J]. International Review of Economics and
Finance, 2024, 91: 69-82.
- [33]曹薇, 赵伟, 司玉静. 数字经济对低碳发展的影响效应研究——基于绿色技
术创新的调节效应与门槛效应分析[J]. 软科学, 2023(9): 47-54.
- [34]邓荣荣, 张翱翔. 中国城市数字经济发展对环境污染的影响及机理研究[J].
南方经济, 2022(2): 18-37.
- [35]余典范, 龙睿, 王超. 数字经济与边界地区污染治理[J]. 经济研究, 2023,
58(11): 172-189.
- [36]周雪峰, 韩露, 肖翔. “双碳”目标下数字经济对企业持续绿色创新的影响
——基于数字化转型的中介视角[J]. 证券市场导报, 2022, 32(11): 2-12.
- [37]刘承毅, 李欣. 环境规制对高碳制造业绿色低碳发展的影响——基于数字技
术的调节效应[J]. 首都经济贸易大学学报, 2023, 25(3): 18-31.
- [38]张悦, 来逢波, 程钰. 市域尺度上市企业数字化转型演变及对碳排放影响[J].
经济地理, 2024, 44(5): 106-116.
- [39]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(6): 131-145.
- [40]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(2): 45-57.

- [41]张争妍,李豫新.数字经济对我国碳排放的影响研究[J].财经理论与实践, 2022, 43(5): 146-154.
- [42]白丽飞.数字经济的碳减排效应研究——兼论财政政策和市场机制的叠加作用[J].甘肃社会科学, 2023(6): 224-236.
- [43]郭希宇.绿色金融助推低碳经济转型的影响机制与实证检验[J].南方金融, 2022(1): 52-67.
- [44]余畅,马路遥,曾贤刚,马冬妍.工业企业数字化转型的节能减排效应研究[J].中国环境科学, 2023, 43(7): 3755-3765.
- [45]王儒奇,陶士贵.数字经济如何影响实体经济发展——机制分析与中国经验[J].现代经济探讨, 2022(5): 15-26.
- [46]杨婧妍,李昱嵩.数字经济对城乡收入差距的影响及其空间溢出效应[J].经济与管理, 2023, 37(5): 9-15.
- [47]刘国帅,钟俊平,辛同.数字经济对居民消费升级的影响——基于空间计量模型分析[J].商业经济研究, 2023, 42(17): 50-53.
- [48]古晨光,李蕾,李佳杰,陈洋毅.数字经济对共同富裕的影响效应检验[J].统计与决策, 2023, 39(16): 17-21.
- [49]王香艳,李金叶.数字经济是否有效促进了节能和碳减排? [J].中国人口·资源与环境, 2022(11): 83-95.
- [50]王凯,唐小惠,甘畅,刘浩龙.中国服务业碳排放强度时空格局及影响因素[J].中国人口·资源与环境, 2021(8): 23-31.
- [51]王帅龙.数字经济之于城市碳排放:“加速器”抑或“减速带”? [J].中国人口·资源与环境, 2023(6): 11-22.
- [52]张三峰,魏下海.信息与通信技术是否降低了企业能源消耗——来自中国制造业企业调查数据的证据[J].中国工业经济, 2019(2): 155-173.
- [53]郭丰,杨上广,金环.数字经济对企业全要素生产率的影响及其作用机制[J].现代财经(天津财经大学学报), 2022(9): 20-36.
- [54]孔令章,李金叶.城市数字经济发展的“减排”与“增效”效应[J].中国人口·资源与环境, 2023(7): 168-179.
- [55]Hampton S E, Strasser C A, Tewksbury J J, et al. Big Data and the Future of Ecology[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2013, 11(3): 156-162.

- [56]Shin D H, Choi M J. Ecological Views of Big Data:Perspectives and Issues[J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(2): 311-320.
- [57]Zhang X H, Wu L Q, Zhang R, et al. Evaluating the Relationships among Economic Growth, Energy Consumption, Air Emissions and Air Environmental Protection Investment in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 18: 259-270.
- [58]常皓亮. 数字经济, 绿色技术创新与碳排放强度——基于我国城市面板数据的经验研究[J]. 商业研究, 2023(2): 73-80.
- [59]陈镜宇, 李卫东, 刘延平, 武冰玉. 数字经济、要素作用转变与城市碳排放——基于调节效应和门槛效应的检验[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2024(2): 137-151.
- [60]郭沛, 王光远. 数字经济的减污降碳协同作用及机制——基于地级市数据的实证检验[J]. 资源科学, 2023(11): 2117-2129.
- [61]刘培. 数据要素影响绿色生态效率的机制与效应研究[J]. 经济经纬, 2023(6): 136-148.
- [62]Ahmed A, Uddin G S and Sohag K. Biomass Energy, Technological Progress and the Environmental Kuznets Curve: Evidence from Selected European Countries[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 90: 202-208.
- [63]Cheng Z H, Li L S and Liu J. The Emissions Reduction Effect and Technical Progress Effect of Environmental Regulation Policy Tools[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149: 191-205.
- [64]Li J L, Chen L T, Chen Y and He J W. Digital Economy, Technological Innovation, and Green Economic Efficiency—Empirical Evidence from 277 Cities in China[J]. Managerial and Decision Economics, 2021, 43(3): 616-629.
- [65]张思思, 崔琪, 马晓钰. 数字要素赋能下有偏技术进步的节能减排效应[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(7): 22-36.
- [66]Munir K, Ameer A. Effect of Economic Growth, Trade Openness, Urbanization, and Technology on Environment of Asian Emerging Economies[J]. Management of Environmental Quality, 2018, 29(6): 1123-1134.
- [67]Chen J D, Gao M, Mangla S K, et al. Effects of Technological Changes on

- China's Carbon Emissions[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2020, 153: 119938.
- [68] Wang J, Lv K J, Bian Y W, et al. Energy Efficiency and Marginal Carbon Dioxide Emission Abatement Cost in Urban China[J]. Energy Policy, 2017, 105: 246-255.
- [69] Jin J, Sheppard S R, Jia B, et al. Planning to Practice: Impacts of Large-Scale and Rapid Urban Afforestation on Greenspace Patterns in the Beijing Plain Area[J]. Forests, 2021, 12(3): 316-316.
- [70] 王维国, 王永玲, 范丹. 数字经济促进碳减排的效应及机制[J]. 中国环境科学, 2023(8): 4437-4448.
- [71] Hasan I, Tucci C L. The Innovation–Economic Growth Nexus: Global Evidence[J]. Research Policy, 2010, 39(10): 1264-1276.
- [72] Ren S, Li L, Han Y, Hao Y and Wu H. The Emerging Driving Force of Inclusive Green Growth: Does Digital Economy Agglomeration Work?[J]. Business Strategy and the Environment, 2022, 31(4): 1656-1678.
- [73] Zhang W, Liu X M, Wang D, et al. Digital Economy and Carbon Emission Performance: Evidence at China's City Level[J]. Energy Policy, 2022, 165: 112927.
- [74] 赵彤彤, 焦方义, 张东超. 数字经济、公共服务与经济高质量发展——基于中国省级面板数据的实证分析[J]. 价格理论与实践, 2023.43(3): 99-102+204.
- [75] 吕德胜, 王珏, 唐青青. 数字经济实现了绿色创新“增量提质”吗——基于异质环境关注视角[J]. 山西财经大学学报, 2023, 45(5): 55-68.
- [76] 张哲华, 钟若愚. 数字经济、绿色技术创新与城市低碳转型[J]. 中国流通经济, 2023, 37(5): 60-70.
- [77] 张华, 梁进社. 产业空间集聚及其效应的研究进展[J]. 地理科学进展, 2007, 26(2): 14-24.
- [78] Zhou G, Xu H, Jiang C, et al. Has the Digital Economy Improved the Urban Land Green Use Efficiency? Evidence from the National Big Data Comprehensive Pilot Zone Policy[J]. Land, 2024, 13(7): 960-960.
- [79] 王磊, 李吉, 王兴启. 数字经济对城市经济绿色转型的影响研究——基于集

- 聚经济的实证分析[J]. 城市问题, 2023, 42(4): 76-86.
- [80]熊万, 高凯, 汪泓, 段晓歌. 长三角地区高技术产业集聚的环境污染效应[J]. 生态经济, 2020, 36(10): 173-178.
- [81]曾刚, 陆琳忆, 何金廖. 生态创新对资源型城市产业结构与工业绿色效率的影响[J]. 资源科学, 2021(1): 94-103.
- [82]葛立宇, 莫龙炯, 黄念兵. 数字经济发展, 产业结构升级与城市碳排放[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022(10): 20-37.
- [83]丛建辉, 刘学敏, 赵雪如. 城市碳排放核算的边界界定及其测度方法[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(4): 19-26.
- [84]胡剑波, 陈行. 绿色财政会增强绿色金融的减排效果吗?——基于减污降碳视角[J]. 财经论丛, 2023(10): 25-35.
- [85]罗茜, 王军, 朱杰. 数字经济发展对实体经济的影响研究[J]. 当代经济管理, 2022(7): 72-80.
- [86]吴传清, 邓明亮. 数字经济发展对中国工业碳生产率的影响研究[J]. 中国软科学, 2023(11): 189-200.
- [87]杨刚强, 王海森, 范恒山, 岳子洋. 数字经济的碳减排效应: 理论分析与经验证据[J]. 中国工业经济, 2023(5): 80-98.
- [88]鲁玉秀, 方行明, 张安全. 数字经济, 空间溢出与城市经济高质量发展[J]. 经济经纬, 2021(6): 21-31.
- [89]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(8): 5-23.
- [90]昌敦虎, 李明奎, 原佳倩, 周继, 马中. 中国资源型城市可持续转型对促进就业和环境治理的影响——基于“人与自然和谐共生”视角的分析[J]. 人口研究, 2023(3): 63-77.
- [91]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, 19(4): 1401-1418.
- [92]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.
- [93]李青原, 肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励——来自上市企

业绿色专利的证据[J]. 经济研究, 2020, 55(9): 192-208.

[94]张丽君, 梁怡萱, 巩蓉蓉. 数字经济对城乡收入差距的动态影响研究——来自中国 31 个省(区、市)的证据[J]. 经济问题探索, 2023, 44(3): 18-40.

[95]向宇, 代沁雯. “双碳”目标下双向 FDI 协调发展的碳减排效应及其空间溢出[J]. 金融经济研究, 2022, 37(2): 105-121.

[96]徐军委, 刘志华, 吴福生. 数字经济能否赋能地区低碳经济转型: 基于中介效应、门槛效应与空间溢出效应[J]. 环境科学, 2024, 49(7): 1-22.

[97]刘满凤, 王帅龙. R&D 投入及其溢出效应对区域经济增长的影响[J]. 科技管理研究, 2017, 37(14): 27-32.

攻读学位期间发表的学术论文目录

- [1] 段影, 潘海峰. 空间溢出视角下数字经济对减污降碳的影响研究[J]. 安徽工程大学学报 (已录用).

致 谢

行文至此，落笔为终。回望这段求学时光，心中满是感激与不舍，诸多温暖与支持汇聚成河，推动我完成这篇论文。

首先，衷心感谢我的导师。从论文选题、研究方法，到框架搭建、字句斟酌，导师始终以渊博的学识、严谨的态度耐心指导。无数次的修改意见，不仅提升了论文质量，更教会我科学的研究思维与治学精神。

感谢学院的老师们，课堂上的谆谆教诲拓宽了我的学术视野；论文评审中提出的宝贵建议，让我得以不断完善研究。感谢同窗好友，备考时的相互鼓励、研究中的思想碰撞，都成为我前行的动力。

最想感恩的是家人，感谢父母默默付出，包容我的忙碌与焦虑，给予我无条件的爱与支持，在我迷茫时给予慰藉与信心。

求学之路虽有艰辛，但因你们而充满力量。未来，我将带着这份感恩继续前行，不负期望，勇毅追梦。