

分类号 \_\_\_\_\_  
U D C \_\_\_\_\_密级 \_\_\_\_\_  
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

## 硕士学位论文

论文题目 数字经济发展对城市碳减排的影响及对策研究

研究生姓名: 姚宇辰

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: 2023年5月30日

## 独创性声明

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

学位论文作者签名： 姚宇辰 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 刘建国 签字日期： 2023.5.30

## 关于论文使用授权的说明

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

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

学位论文作者签名： 姚宇辰 签字日期： 2023.5.30

导师签名： 刘建国 签字日期： 2023.5.30

# **Research on the Influence and Countermeasures of Digital Economy Development on Urban Carbon Emission Reduction**

**Candidate : Yao Yuchen**

**Supervisor: Liu Jianguo**

## 摘要

当下,我国的数字经济全面发展,为经济社会带来了巨大变革。大数据、互联网与人工智能的出现,不仅为人们的生活带来了便利,还能助推数字产业与传统产业深度融合,改善生产结构,提高生产效率,促进企业绿色转型。充分发挥数字经济优势,能够为我国实现“双碳”目标提供新契机。因此,深入分析数字经济与碳排放之间的关系,对实现社会绿色发展具有重要意义。

本文基于空间经济视角,聚焦数字经济发展对城市碳排放的空间特征以及主要影响效应,开展文献回顾、理论分析与实证检验。在理论方面,构建以扩展的IPAT等式为基础的理论模型,深入分析数字经济对城市碳排放的内在作用机制;在实证方面,采用历年城市统计数据制备了2011—2020年我国279个地级市及以上城市的面板数据,进行空间相关性、空间溢出效应和空间异质性分析,并从经济发展与技术进步两方面阐述了数字经济发展对城市碳排放的作用路径,采用替换空间权重矩阵、剔除直辖市以及替换被解释变量的方法保证其稳健性,试图从理论与实证两方面廓清数字经济影响城市碳排放的主要机制效应。

研究发现:(1)数字经济发展与城市碳排放分别呈现“东高西低”“北高南低”的分布态势,同时两者均存在显著的空间相关性特征。(2)数字经济发展对城市碳排放的影响存在先促进,后抑制的倒“U”型趋势,其影响过程能够通过空间外溢作用于周边地区。(3)在单一路径中,经济发展能够缩小数字经济发展对城市碳排放的非线性趋势,而技术进步对数字经济的影响效应具有“放大”作用。在双重路径中,经济发展是主要影响途径,而技术进步的作用相对较小。(4)在空间异质性方面,数字经济对城市碳排放的影响效应由强到弱依次为:西部地区、东北地区、中部地区和东部地区。同时,大部分城市没能跨越拐点,表明数字经济助力城市低碳减排仍处于初级阶段。

本研究主要对策建议:(1)完善城市数字基础设施建设,营造良好的数字金融环境,为数字产业发展赋能。(2)加强区域数字经济发展联系,构建碳排放的协同减排机制,发挥碳减排的正向促进作用。(3)利用经济发展的作用路径,发挥经济集聚对环境的正向作用,助益城市低碳减排。(4)培育数字技术相关人才,发挥技术进步的减排优势,强化技术效应良性溢出。

**关键词:** 数字经济 碳排放 空间溢出效应 空间交互效应 空间异质性

## Abstract

The overall development of our digital economy has brought significant changes to the economy and society. The emergence of big data, the Internet, and artificial intelligence not only brings convenience to people's lives but also promotes the deep integration of digital and traditional industries, improves the production structure, improves production efficiency, and promotes the green transformation of enterprises. Giving full play to the advantage of the digital economy can provide a new opportunity for our "double carbon" goal. Therefore, an in-depth analysis of the relationship between the digital economy and carbon emissions is of great significance for realizing green social development.

Based on the perspective of spatial economy, this paper focuses on the spatial characteristics and main effects of digital economy development on urban carbon emissions. It carries out the literature review, theoretical analysis, and empirical test. We build a theoretical model based on the extended IPAT equation to deeply analyze the internal mechanism of the digital economy on urban carbon emission. Empirically, we prepare the panel data of 279 prefecture-level cities and above from 2011 to 2020, using urban statistical data. The spatial correlation, spatial spillover effect, and spatial heterogeneity are analyzed. In addition, we expound on the practical path of digital economy development on urban carbon emissions from economic development and technological progress. By replacing the spatial weight matrix, eliminating the municipalities directly under the central government, and replacing the

explained variables to ensure its robustness, the paper attempts to clarify the main mechanism effects of the digital economy on urban carbon emissions from theoretical and empirical aspects.

The results show that: (1) Digital economy development and urban carbon emission present a distribution trend of "high in the east and low in the west" and "high in the north and low in the south," respectively, and both have significant spatial correlation characteristics. (2) The impact of digital economy development on urban carbon emission has an inverted "U" -shaped feature of promoting first and then inhibiting, which can affect surrounding areas through spatial spillover. (3) In a single path, economic development can narrow the nonlinear trend of the digital economy on urban carbon emissions. At the same time, technological progress has a "magnifying" effect on the digital economy. In the dual path, economic development is the primary influence, while technological progress plays a relatively minor role. (4) Regarding spatial heterogeneity, the effects of the digital economy on urban carbon emissions from strong to weak are as follows: western region, northeast region, central region, and eastern region. At the same time, most cities fail to cross the inflection point, indicating that the digital economy's contribution to urban low-carbon emission reduction is still in its initial stage.

The primary recommendations and countermeasures from this study are as follows: (1) The government should improve the construction of urban digital infrastructure, create an excellent digital financial environment, and empower the development of the digital industry. (2) The government should strengthen

the development of the regional digital economy, build a collaborative carbon emission reduction mechanism, and play a positive role in promoting carbon emission reduction. (3) The government should take advantage of the role path of economic development, give full play to the positive effect of economic agglomeration on the environment, and help reduce urban low-carbon emissions. (4) The government should cultivate digital technology-related talents, give full play to the emission reduction advantages of technological progress, and strengthen the benign spillover of technological effects.

**Keywords:** Digital economy; Carbon emissions; Spatial spillover effect; Spatial interaction effect; Spatial heterogeneity

# 目 录

<b>1 绪 论</b> .....	<b>1</b>
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 .....	2
1.2.1 研究思路 .....	2
1.2.2 研究内容 .....	3
1.2.3 技术路线图 .....	4
1.2.4 研究方法 .....	5
1.3 本文创新点 .....	5
<b>2 文献综述</b> .....	<b>7</b>
2.1 数字经济内涵与测度 .....	7
2.1.1 数字经济内涵 .....	7
2.1.2 数字经济测度 .....	8
2.2 碳排放影响因素与测度 .....	9
2.2.1 碳排放影响因素 .....	9
2.2.2 碳排放测度 .....	11
2.3 数字经济对碳排放的影响 .....	12
2.4 文献评述 .....	13
<b>3 数字经济发展影响城市碳减排的理论分析</b> .....	<b>14</b>
3.1 理论基础 .....	14
3.1.1 拓展的 IPAT 模型 .....	14
3.1.2 环境库兹涅兹原理 .....	15
3.1.3 新经济地理学理论 .....	15
3.2 数字经济发展影响城市碳排放的理论模型推导 .....	16
3.3 数字经济发展影响城市碳减排的效应分析 .....	19
3.3.1 数字经济发展影响城市碳减排的正向促进作用 .....	19

3.3.2 数字经济发展影响城市碳减排的负向抑制作用 .....	20
3.3.3 数字经济发展影响城市碳减排的重要作用路径 .....	21
<b>4 数字经济发展与城市碳排放现状分析 .....</b>	<b>23</b>
4.1 数字经济测度与现状分析 .....	23
4.1.1 数字经济指数构建 .....	23
4.1.2 数字经济测度 .....	24
4.1.3 数字经济现状分析 .....	25
4.2 碳排放测度与现状分析 .....	28
4.2.1 碳排放测算 .....	28
4.2.2 碳排放现状分析 .....	30
4.3 数字经济发展与城市碳排放的空间相关性分析 .....	31
4.4 本章小结 .....	36
<b>5 数字经济发展影响城市碳减排的实证分析 .....</b>	<b>38</b>
5.1 数据、变量与模型 .....	38
5.1.1 数据来源 .....	38
5.1.2 变量选取 .....	39
5.1.3 模型构建 .....	41
5.2 数字经济发展对城市碳减排的影响分析 .....	42
5.2.1 模型选择检验 .....	42
5.2.2 数字经济发展影响城市碳减排的空间效应分析 .....	43
5.2.3 数字经济发展影响城市碳减排的稳健性检验 .....	47
5.2.4 数字经济发展影响城市碳减排的空间交互效应分析 .....	48
5.2.5 数字经济发展影响城市碳减排的空间异质性分析 .....	50
<b>6 结论、对策与展望 .....</b>	<b>52</b>
6.1 主要结论 .....	52
6.2 对策建议 .....	53
6.3 不足与展望 .....	54
<b>参考文献 .....</b>	<b>55</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>61</b>

<b>附录一：在读期间科研成果</b> .....	<b>62</b>
(一) 发表的学术论文 .....	62
(二) 参与的科研项目 .....	62
<b>附录二</b> .....	<b>63</b>

# 1 绪 论

## 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，与社会的发展息息相关。碳排放作为环境问题的主要原因之一，在全球范围内受到普遍关注。自 IPCC 在报告中指出全球变暖趋势肇始（IPCC, 2007），各国很快明确了温室气体引致气候变暖的事实。《巴黎协定》首次提出了全球温控目标，《联合国气候变化框架公约》亦针对全球气候问题提出“共同但有区别的责任”原则。在此背景下，我国承诺将在工业化和城镇化的进程中，自觉完成低碳绿色转型任务，将争取在 2030 年前达到碳峰值，2060 年前实现碳中和，以此作为新发展格局下的重要目标。

随着时代的发展，依托于互联网、大数据与人工智能的数字经济应运而生，作为高质量发展的重要推动力，数字经济渗透到经济生活的方方面面，为经济社会带来了深刻变革。党的二十大报告中强调：“加快发展数字经济，促进数字经济和实体经济深度融合”。数字经济发展是科技革命和产业变革的题中应有之义，是助力产业转型升级的必然选择。已有研究显示，在传统产业领域，数字技术的使用能够改进原本的生产方式，优化行业的生产工艺，从而提升生产制造效率，加速能源结构调整，推动传统产业智能化发展，促使生产过程中的能耗减少（迟明园和石雅楠，2022）。在新型产业领域，数字化发展有助于通过大数据等方式对环境进行实时监测（解春艳等，2017），还能使企业利用数字化手段分析产品需求，优化资源配置，从而实现节能减排的目的（谢雄标等，2015）。

然而，由于我国是在保持经济中高速增长的同时，努力完成低碳转型任务，与发达国家相比具有显著的差异性特征，势必面临更多的能源需求，使得低碳减排的形势变得更加严峻（杨莉莎等，2019）。一方面，我国的能源结构以煤炭为主，经济发展会增加煤炭的开采和消耗，对环境具有负外部性；另一方面，顺应数字经济发展趋势，有助于提升资源利用效率，推进减污降碳，突破可持续发展瓶颈。鉴于我国情况的特殊性和复杂性，现阶段数字经济能否助力低碳减排？如若有影响，其影响的作用机制是怎样的？以及其影响程度在不同区域间有何差异？值得进一步探讨。

## 1.1.2 研究意义

在新发展格局下，数字技术与相关产业的深度融合能够倒逼产业绿色转型，对于降低温室气体的排放，顺应全球的低碳发展趋势具有重要意义。本文旨在探究数字经济发展对碳排放的影响效应，聚焦城市维度数字经济发展与碳排放的相关性与时空演化特征，从理论推导与实证检验两个层面廓清数字经济作用于城市碳减排的空间特征及其作用机制，同时结合我国绿色发展的现状，提出低碳减排的对策建议。

在理论意义层面，通过对数字经济发展和碳排放相关理论的梳理，本文构建“数字经济—城市碳排放”分析框架，研究我国数字经济发展与城市碳排放的相互关系。其一，城市之间往往存在空间联动性，探究两者的空间相关性和空间异质性，既是对空间经济学的有益补充，又丰富了环境经济学的研究内容；其二，从经济发展与技术进步两方面，探讨数字化发展影响城市碳排放的作用路径，挖掘其中的经济内涵，能够为后续城市低碳减排的相关研究提供理论参考与实证支持。

在现实意义层面，我国仍然处于工业化中期，存在要素错配、结构失衡、资源浪费和温室气体大量排放等现实问题。随着人口的增长和城镇化进程的加剧，社会对化石能源的需求仍会增加，通过研究数字经济发展对城市低碳减排的影响效应和内在机制，提出相应的政策建议，有助于更好地建设数字中国，缓解碳排放压力，落实“双碳”目标，对于促进经济可持续发展，形成环境友好型社会具有重要意义。

## 1.2 研究思路与方法

### 1.2.1 研究思路

数字经济具有创新性、覆盖性和渗透性，能够改造传统工业生产，转化“线上线下一体化”活动模式，优化能源结构，降低资源浪费，具有低能耗、低污染和低成本的特征，对区域经济绿色发展具有一定的积极意义。本文围绕数字经济发展对城市碳排放的影响效应以及作用机制这一核心问题，进行理论分析与实证检验。首先，基于已有研究成果，梳理数字经济与碳排放的相关理论，引入“数字经济—城市碳排放”研究框架，构建符合研究内容的理论模型，推导数字经济低碳减排的内在机理；其次，构造空间计量模型，分析数字经济对本地与周边城市碳排放的影响，进一步解析碳减排的关键变量与作用路径；再次，考察数字经济影响城市碳排放的过程是否存在空间异质性；最后，根据理论

分析与实证检验，结合我国当前的数字经济发展背景与现有碳减排经验，提出具有针对性的低碳减排对策建议。

## 1.2.2 研究内容

本文着眼于数字经济极大地影响了城市生态环境这一现实问题，通过梳理数字经济与碳排放的相关文献与发展现状，构建相应的理论与实证模型进行研究分析，主要内容安排如下：

第一章，绪论。本章通过梳理数字经济与碳减排的研究背景，探讨研究的理论与现实意义，针对数字经济能否助力城市碳减排的问题，梳理相应的研究思路，同时介绍研究方法、研究内容以及本文的创新点。

第二章，文献综述。本章从国内外的大量文献入手，分别梳理了数字经济的内涵和测度方法，碳排放的影响因素与测度手段，以及数字经济对碳排放的影响效应，最后针对前人的研究结果进行文献评述，阐述本文不同于现有文献的研究视角和研究方法，从而凸显本文的研究价值。

第三章，理论分析。本章通过梳理理论成果，运用拓展的 IPAT 等式构造理论模型，推导数字经济对城市碳排放的影响过程，探讨数字经济对城市碳减排的正向促进与负向抑制作用，挖掘数字经济影响城市碳排放的两条作用路径，进而提出本文的研究假设。

第四章，现状分析。本章首先对城市维度的数字经济与碳排放变量进行测算，然后运用空间分位图直观刻画数字经济与碳排放的空间分布格局，最后运用莫兰指数与 LISA 集聚图对数字经济与碳排放进行了空间相关性分析。

第五章，实证分析。本章首先对数据、变量和模型进行了说明，在此基础上运用空间非线性回归模型，分析数字经济发展影响城市碳排放的倒“U”型关系，通过替换空间权重矩阵、剔除直辖市和替换被解释变量，验证回归结果的稳健性；然后，将经济发展与技术进步同数字经济的交互项纳入空间杜宾模型进行机制分析；最后，通过划分东部、中部、西部与东北地区进行空间异质性检验，并得出相应的研究结论。

第六章，结论、对策与展望。本章首先将理论与实证分析结果进行了归纳和整理，然后根据研究结论，从政策层面提出了数字经济赋能城市降碳减排的对策建议，最后就本文的不足作出展望。

### 1.2.3 技术路线图

论文的技术路线图如图 1.1 所示：

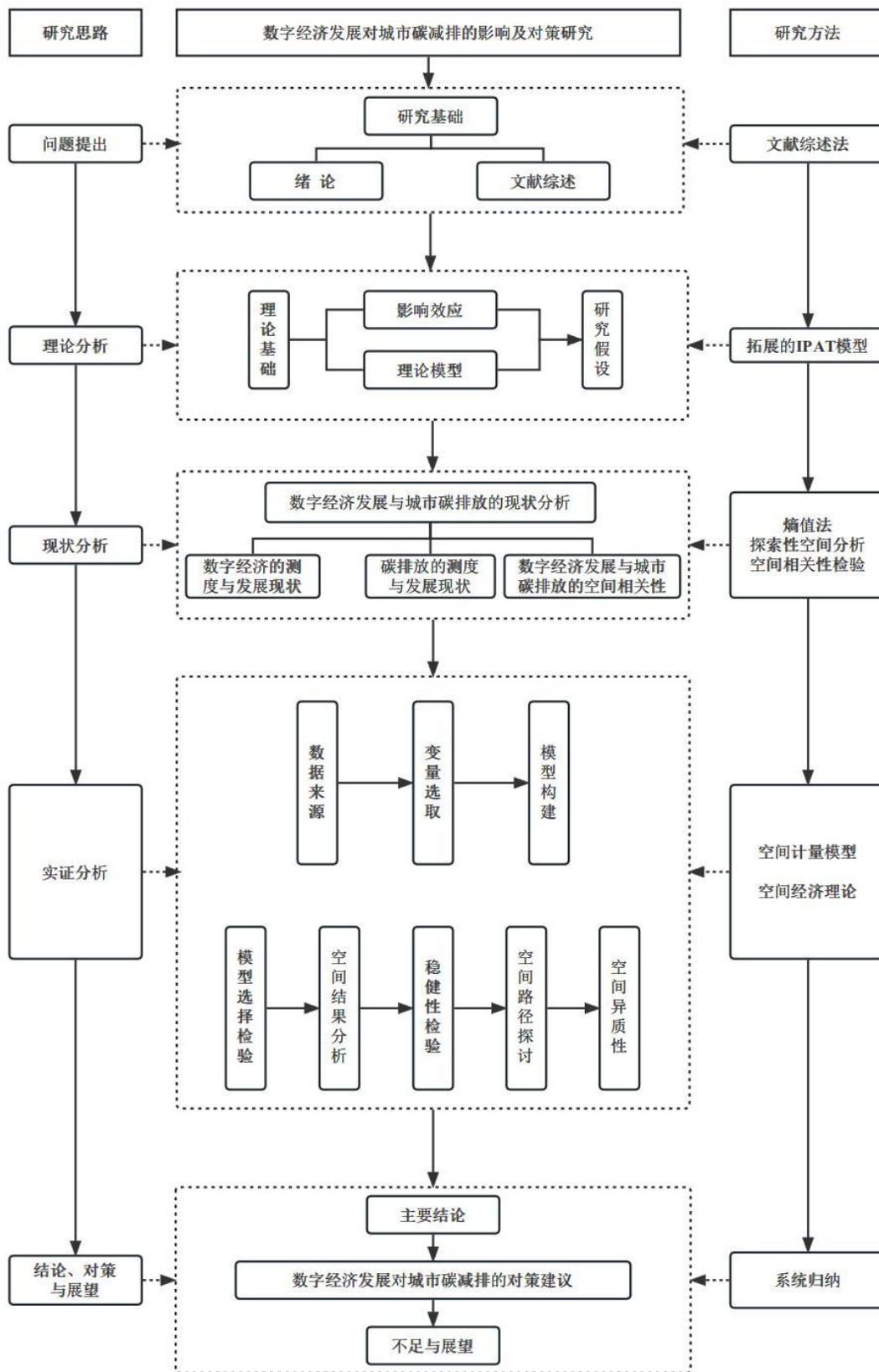


图 1.1 本论文的研究框架与技术路线

### 1.2.4 研究方法

本文在总结以往文献的基础上，分析数字经济发展对城市碳减排的影响效应和作用机制。文章主要采取以下研究方法：

（1）文献分析法：为探究数字经济发展对城市碳减排的影响效应，本文运用文献分析法，系统回顾了数字经济与碳排放的国内外文献，对数字经济内涵、碳排放的影响因素、以及二者之间的相互关系进行梳理与总结，并针对现有文献的不足，提出本文的研究方向与研究问题。

（2）熵值法：本文采用熵值法从数字基础设施建设、数字产业发展以及数字金融环境三个维度构建指标体系，以此测度城市维度的数字经济综合指数，衡量城市层面的数字经济发展水平。

（3）环境影响控制模型（IPAT 模型）：该模型主要研究生活富裕度、人口因素与技术水平对于生态环境的影响。为了进一步建立数字经济与城市碳排放的联系，本文结合拓展的 IPAT 等式，将数字经济分别纳入生活富裕度与技术水平，并利用严谨的数学公式推导数字经济发展影响城市碳排放的作用机制，试图从影响路径中剖析城市碳减排的可行方法。

（4）空间计量模型：为研究数字经济与城市碳排放的相互关系，文章需将城市之间的空间联动性与碳排放的空间特征纳入考量。因此，本文采用空间计量模型作为基准回归、影响路径与异质性分析工具，探讨数字经济发展对本地与外地城市的碳减排效果。

### 1.3 本文创新点

本文通过对既有成果的梳理与总结，探究数字经济发展对城市碳减排的影响效应与作用机制，可能的创新之处有三点：

（1）研究视角的创新：本文将数字经济与城市碳排放纳入同一分析框架，不仅拓展了数字经济环境效应的研究方向，而且探讨了影响碳排放的创新手段。同时，以往研究大多在省域层面探讨数字经济对生态环境的影响，样本容量相对较小，可能会忽略研究细节。本文不同于以往研究，基于我国 279 个地级市及以上城市面板数据进行分析，扩大了样本容量，尽可能避免了研究偏差。

（2）研究内容的创新：不同于以往的研究成果，本文在探究数字经济影响城市碳排放的过程中，将数字经济与碳排放的空间特征考虑在内，采用空间面板模型进行研究

分析，同时运用 ArcGis10.7 绘制核心变量的空间分位图与 LISA 集聚图，反映数字经济发展与碳排放的时空发展趋势。最后，在全面且深入分析的基础上，文章提出了充分利用数字经济优势低碳减排的有益对策。

（3）研究方法的创新：本文不仅在理论分析中运用拓展的 IPAT 等式，推导数字经济作用于城市碳排放的内在机制，而且在实证分析中采用空间非线性回归模型，验证数字经济发展对城市碳排放的非线性影响过程，从而丰富了相应的理论与实证研究。

## 2 文献综述

### 2.1 数字经济内涵与测度

#### 2.1.1 数字经济内涵

数字经济的概念最早由 Tapscott (1996) 提出并应用于学术领域, 他探讨了美国信息化时代的发展特征, 并指出数字经济会依赖于电子商务而迅猛发展, 但并没有对其内涵进行详细地阐述。此后, 国内外学者与政府都在对数字经济进行深入研究, 但迄今为止都没能得出一个统一的标准。Neal (1999) 认为数字经济是互联网与电子商务相互融合的变革。乌家培 (2000) 认为数字经济与网络经济本质上没有区别。Beomsoo (2002) 认为微观主体需要的服务均依赖于信息技术, 数字经济是一种新的经济形态。Turcan 等 (2014) 认为数字发展能够催生新经济, 信息化发展是数字经济的核心内容。Bukht 和 Heeks (2018) 将数字经济的内涵划分为核心层、狭义层与广义层。其中, 核心层主要包含 IT 部门和电信服务业; 狭义层主要包含平台经济与数字服务; 而广义层涉及到电子商务、算法经济与精准农业等诸多领域。政府对数字经济的定义集中于信息技术、要素投入与经济活动。美国将数字经济定义为电子商务与信息技术; 俄罗斯将数字经济视为日常生活中通过信息技术进行的经济活动; 英国认为数字经济是信息要素投入产生的社会效益。

我国主要从信息化产业与其他产业融合的视角探究数字经济发展的内涵, 倾向于将数字经济定义为一种经济活动。2016 年, G20 杭州峰会将数字经济定义为以使用数字化的知识和信息作为关键生产要素、以现代信息网络作为重要载体、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<sup>①</sup>。2021 年, 国家统计局继续沿用该定义, 同时将知识与信息要素凝练为数据要素, 认为数字经济主要由数字产业化与产业数字化构成, 涉及到生产生活的方方面面<sup>②</sup>。

参照我国政府对数字经济的分类以及文章的研究视角, 本文对数字经济界定如下: 数字经济依托于数据要素, 是以通信技术与人工智能为重要载体的经济活动, 具有较强的渗透性, 较广的覆盖性, 不仅能够创造全新的经济业态, 而且能够助力传统产业转型升级, 提升经济效率, 优化经济结构。

<sup>①</sup> 来源于《二十国集团数字经济发展与合作倡议》。

<sup>②</sup> 来源于《数字经济及其核心产业统计分类 (2021)》。

数字经济的快速发展为当下的经济生活带来了深刻的历史性变革（江小涓，2021），已成为实现经济高质量发展的重要推动力，进而引发了学术界对于数字经济空间特征、影响效应以及测算方法的讨论。在空间特征方面，数字经济发展水平在我国省域和城市维度均具有空间分异性特征。王彬燕等（2018）发现数字经济存在空间集聚现象，其发展水平在省域维度和城市维度均呈现自东向西递减的态势。Wang等（2022）运用莫兰指数验证了数字经济在城市层面的空间集聚现象，同时指出这种集聚态势会随着时间的推移越来越明显。金灿阳等（2022）利用修正的引力模型和社会网络分析法，探讨了省域数字经济发展的空间关联程度，研究发现东部沿海地区的数字经济发展远高于西部内陆地区，同时东部地区的集聚效应和溢出效应更加显著。由此可见，数字经济的不平衡发展可能会导致东西部出现“数字鸿沟”。后续研究需要将数字经济的空间分布考虑在内，才能使研究结果更加符合我国社会现实。在影响效应方面，学者们大多聚焦于数字经济与高质量发展（赵涛等，2020）、产业结构升级（迟明园和石雅楠，2022；刘翠花，2022）、城乡收入消费鸿沟（易行健和周利，2018；张贺和白钦先，2018；张彤进和蔡宽宁，2021）以及高质量就业的研究（孟祺，2021）。

随着数字经济对社会发展的影响日益加深，数字经济与生态环境的关系引起了学者的关注。目前国内外的研究主要有以下三种观点。第一种观点认为，数字经济发展能够带来技术革新，促进企业增产增收，加大企业成本投入，促进经济增长，从而倒逼企业增加能源消费（Hamdi et al., 2014），加剧生态环境恶化（金培振等，2014）。第二种观点认为，数字经济能够调整能源结构和产业规模，减少企业的生产能耗，提升企业的绿色全要素生产率（梁琦等，2021；刘强等，2022；张帆等，2022），对于改善环境问题（李广昊和周小亮，2021；邓荣荣和张翱翔，2022），缓解资源依赖（徐昊和马丽君，2022），助力生态治理具有重要作用。第三种观点认为，数字经济对生态环境的影响并非简单的线性关系，而是具有显著的非线性特征，其研究结果可能为类似环境库兹涅兹曲线的倒“U”型关系（李治国和王杰，2022）。通过相关文献的梳理，本文发现数字经济与绿色发展主要有抑制、促进与非线性三种关系，研究结论存在分歧。同时多数文献没有采用空间计量方法进行研究。因此，数字经济的环境效应有待进一步探讨。

### 2.1.2 数字经济测度

当前，有两类测度方案为我国数字经济的操作化分析作出了贡献。

第一类是研究机构、企业或学校编制的数字经济指数。如中国信息通信研究院从数

字产业化、产业数字化、数字化治理和数据价值化编制数字经济指数（中国信息通信研究院，2022）。国家统计局从数字产业化和产业数字化两方面界定了数字经济。又如腾讯研究院组织编制的覆盖全国 31 个省份 351 个城市的数字经济指数，该指数从数字产业指数、数字生活指数、数字政务指数和数字文化指数四个维度加权平均，测算得到数字经济综合指标。再如北京大学与蚂蚁金服集团联合编制的从数字普惠金融的覆盖广度、使用深度以及数字化程度构造的中国数字普惠金融体系（郭峰等，2020），为后续开展学术研究和实务分析提供了很好的数据支持。

第二类是学者进行综合修正拓展形成新的指数和指标体系。赵涛等（2020）着眼于城市维度，从互联网发展和数字金融普惠两方面构建多维度的数字经济评价体系。王军等（2021）通过数字经济发展载体、数字产业化、产业数字化和数字经济发展环境，全方位测算了省域层面的数字经济发展指数。柏培文和张云（2021）运用主成分分析法与无量纲化处理法，将数字产业、数字创新、数字用户和数字平台四类指标合成城市数字经济指数。陈贵富等（2022）运用改进的熵值法从数字基础设施、数字产业化、产业数字化和数字创新四个方面对城市数字经济进行了测算，其中数字创新包含了 5G 产业专利授权数、工业互联网专利授权数和电子商务专利授权数，从而体现数字技术发展水平。由于本文是在城市层面进行数字经济对碳排放的理论探讨和实证检验，考虑到数据的时间跨度、获取难度以及单一指标存在的局限性，主要参考赵涛和陈贵富等学者的测度方法从数字基础设施、数字产业发展与数字金融环境入手，构建城市数字经济测度指标体系。

## 2.2 碳排放影响因素与测度

### 2.2.1 碳排放影响因素

数字经济的蓬勃发展一定程度上能够刺激环境，影响温室气体排放，继而引发了学术界对于以碳排放为主的温室气体的探讨。针对碳排放能否达到“双碳”既定目标以及是否会出现反弹现象，学者们展开了激烈的研究与讨论，在碳排放影响因素和测度方法上成果颇丰。

在碳排放驱动因素的研究中，目前主要有三种研究方法：其一，基于 IPAT 以及 STIRPAT 模型（Ehrlich and Holdren, 1971; Dietz and Rosa, 1994）；其二，基于经济增长与生态环境的环境库兹涅兹曲线（Grossman and Kureger, 1995; 林伯强, 2009）；

其三，基于因素分析法的结构分解法和指数分解法（Peters et al., 2007；陈诗一，2011；杨莉莎等，2019）。

多数研究在技术进步、能源效率以及能源结构方面对低碳减排进行探讨。Mizobuchi（2008）认为技术进步是减少能源使用和二氧化碳排放的重要手段之一。但与此同时，这种减少使得每单位能源服务的实际成本降低，从而导致企业对能源服务的需求增加。而能源服务需求的增加，使得碳减排难以达到预期目标。Ang（2009）采用经济环境理论和现代内生增长理论的分析框架，研究发现：我国的二氧化碳减排程度与研发强度、技术转移以及外来技术的吸收能力呈正相关关系。他同时提出：鼓励生产技术创新不仅能够直接遏制环境污染，还能有效吸收外来技术，拥有前沿绿色手段，进而赶超发达国家。王锋等（2013）运用对数平均指数分解法测算省域经济变量对碳减排的贡献程度，研究发现每个省区的碳强度变动、能源强度变动、能源结构调整、产值份额变动和碳排放份额变动共同决定了全国碳强度的变动，同时每个省区对全国碳减排的贡献主要取决于其能源效率的提高。杨莉莎等（2019）结合指数分解与生产理论分解的综合分解框架，探讨我国区域和产业碳排放变动的驱动因素，研究发现能源结构、投入要素、技术进步、技术效率与产业结构均能够促进碳减排。其中，技术进步是促进低碳减排的主要驱动力，但在助力碳减排过程中存在一定程度的反弹效应。同时，区域与产业的减排均存在显著差异，东部地区与第二产业的碳减排效果最好，但是现阶段的减排成果被大幅度削减。

此外，人口因素、外商投资、环境规制都对碳排放有一定的影响。在人口因素层面，Shi（2003）通过对 STIRPAT 模型进行修正，首次在研究碳排放影响因素时将人口年龄结构变动纳入驱动因素，针对世界近 100 个国家和地区 1975—1996 年的面板数据开展实证研究，经过分析发现：劳动年龄人口对低碳减排具有积极作用，同时其影响效果在发展中国家比发达国家更加显著。朱勤等（2010）同样运用 STIRPAT 扩展模型，发现居民消费水平、人口城市化率与人口规模三个因素均能显著影响我国碳排放的总量变化，现阶段居民消费和人口结构对碳减排的影响力大于人口规模的影响力。在外商投资层面，外商投资对生态环境的影响主要有改善和恶化两种观点。许和连和邓玉萍（2012）通过探索性空间分析法，研究 FDI 与生态环境的省域空间分布与动态跃迁，根据空间冲击的不同方式，构建空间滞后模型（SAR）和空间误差模型（SEM），发现 FDI 的空间集群有助于改善我国的环境状况，即 FDI 恶化环境的假说在我国不成立。在环境规制方面，李菁等（2021）在研究碳排放强度的影响因素时，将技术创新约束与环境规制考虑在内，发现环境规制对碳减排的影响不是简单的线性关系，在技术创新水平的中区与低区，正

式与非正式环境规制均会增加碳排放，而在技术创新水平的高区，环境规制能够在一定程度上抑制碳排放，也即环境规制对碳排放强度的影响呈现门槛效应特征。随着时间的推移，环境规制对碳减排的影响持续增加，这也表明未来通过环境规制低碳减排的潜力巨大。

## 2.2.2 碳排放测度

在碳排放测度的研究方法中，主要有三种方法作出了巨大贡献。

第一种是采用绝对指标：碳排放总量。一方面，可以通过碳排放实测法获取碳排放总量。该方法测度的碳排放最为准确，但数据较难获取。另一方面，可以通过排放因子法估计碳排放。研究者普遍认为碳排放来源于直接能源与间接能源。直接能源主要包括煤炭、石油与天然气，间接能源主要包括社会电力和热能。借鉴 IPCC 提供的相关转化因子，计算各种能源消耗产生的二氧化碳排放量，最后将其相加即可得出碳排放总量（吴建新和郭智勇，2016；韩峰和谢锐，2017；Shan，2018）。相较碳排放实测法，该方法存在一定误差，但可操作性较强，使用场景较广，故本文优先选择排放因子法进行测算。由于我国电力需求对煤炭的依赖性仍然很大，现阶段燃煤发电产生的二氧化碳排放占比突出（林伯强，2009）。

第二种是采用相对指标。（1）人均碳排放，也即碳排放总量与地区人口数的比值。该指标侧重社会公平分析，被大多数国外学者运用。（2）碳排放强度，也即碳排放与地区生产总值的比重，侧重社会效率分析。大多数中国学者采用该指标进行研究。（3）碳生产率，也即单位碳排放量所促进的 GDP 增长程度，与碳排放强度互为倒数，其中碳排放量由各个能源碳排量构成。由于工业排碳量较高，延伸出了工业碳生产率等测算方法（任晓松等，2021）。（4）碳排放效率。学者们通过数据包络分析( DEA) 模型、随机前沿模型和 CGE 模型等方法，测算能够反应碳排放的效率指标，该指标能够较为全面地反映碳排放的现状（Wang et al.，2012；Lin and Du，2015；张金灿和仲伟周，2015；Zha et al.，2016；相天东，2017；瞿小松等，2017）。但是由于数据要求较高，目前有关碳排放效率的测度全部集中于省域层面。

第三种是构建创新型指标。受限于数据的获取，目前，不少学者认为夜间灯光数据能够反映城市的发展程度，进而反映能源消耗水平。因此通过构建空间网格数据、DMSP-OLS 和 NPP-VIIRS 夜间灯光遥感数据，能够研究市县级的碳排放状况。城市的能源消耗越大，城市碳排放越多。Chen 等（2020）为测度我国城市维度的二氧化碳排放情

况，利用校正后的 NPP-VIIRS 夜间灯光数据，估计省域与城市维度的二氧化碳排放量，进而验证了环境库兹涅茨曲线理论。邓荣荣和张翱翔（2021）运用夜间灯光数据反推城市碳排放，将设定好的线性模型与碳排放量进行拟合，结果发现碳排放的实际值与估计值存在很强的相关性。由于夜间灯光具有饱和性，以夜间灯光数据估算碳排放存在一定的测量偏误。因此，目前该方法仍有很多争议。

考虑到城市碳排放数据的可靠性与可得性，本文主要借鉴第二种方法，即碳排放的相对指标，测算碳排放强度和人均碳排放量。

## 2.3 数字经济对碳排放的影响

上世纪 90 年代，Grossman 和 Krueger 将库兹涅茨曲线引入环境领域，发现经济发展与环境污染存在倒“U”型关系，也即环境污染会随着经济的发展先增加，后减少，而产业变迁与技术进步能够助力经济增长，造成生态环境先退化，有好转的现象。数字经济是经济社会发展的重要引擎，作为经济增长的主要驱动力，能够打破时空限制，加速产业绿色转型，促进环保技术创新，进而影响生态环境。因此，数字经济对生态环境的影响可能存在类似环境库兹涅茨理论的情况。

近年来，数字经济的环境效应越来越受到学界的关注。聚焦于数字经济对碳排放的影响效应，部分学者进行了相关研究。Li 等（2021）基于 STIRPAT 模型，利用 2011—2017 年的面板数据，将能源结构和数字经济对碳排放的影响进行了实证检验，研究发现数字经济能够调节以煤为主的能源结构对碳排放的驱动作用。谢云飞（2022）利用省级面板数据从数字企业的环境友好型特征、数字产业助力其他产业降低排碳量以及数字经济对碳交易市场的推进作用三个方面阐述了数字经济助力碳减排的直接方式，并通过能源结构与技术进步探究其间接途径。徐维祥等（2022）运用空间模型分析数字经济发展对城市碳排放的影响，发现数字经济发展显著改善了城市碳排放，其空间溢出效应存在边界效应，通过引入“智慧”外生冲击进行空间 DID 检验，发现该结论仍具有稳健性。李治国和王杰（2022）在传统生产函数中嵌入经济集聚、数字经济和碳排放进行机制研究，发现数字经济对碳排放的影响存在倒“U”型的非线性关系，其影响过程还存在显著的空间溢出效应。综上所述，现有研究主要从直接作用和间接作用方面探讨数字经济对碳排放的影响路径，同时其影响过程可能存在非线性特征。

## 2.4 文献评述

回顾前人的研究成果，目前研究数字经济环境效应的文章较为丰富。从研究理论上，相关学者主要运用环境库兹涅兹理论、扩展的 IPAT 模型以及新经济地理学进行理论分析。从研究路径上看，现有研究主要从数字经济本身的规模效应和绿色效应入手直接探讨数字经济的减排效应，从能源结构、技术进步和产业结构等方面探讨数字经济对碳减排的间接效应。大部分学者认为数字经济有助于低碳减排，也有少部分学者提出其影响过程并非是单纯的线性关系。从研究启示上看，在数字经济时代，促进碳交易市场发展、降低企业线下成本和建立数字环境友好型企业对于助力低碳减排具有重要意义。

国内外学者的相关研究取得了丰硕的成果，但聚焦于数字经济对碳排放的机制探讨和实证检验仍有不足：首先，大多文献的路径研究局限于理论分析，缺少相应的理论模型推导。其次，绝大部分探究数字经济环境效应的文献仅仅考虑到了线性关系，忽视了可能存在的非线性特征。最后，缺少在空间维度上数字经济与碳排放分布格局、动态变迁以及城市空间异质性的相关考察。

基于前人的研究，本文在梳理大量文献的基础上，运用 2010—2020 年 279 个城市的面板数据，构建数字经济与碳排放的综合指标，将数字经济与城市碳排放纳入一个框架进行分析，以此构造基于拓展的 IPAT 等式的理论模型，探究其内在影响机制，在进行空间相关性检验后，通过空间计量模型解析数字经济发展对城市碳排放的影响效应与作用机制，通过替换空间矩阵、替换被解释变量与剔除直辖市检验其稳健性，然后通过划分东部、中部、西部与东北地区进行空间异质性分析，最终为实现我国数字经济时代的“双碳”目标提出可行建议。

### 3 数字经济发展影响城市碳减排的理论分析

#### 3.1 理论基础

##### 3.1.1 拓展的 IPAT 模型

随着经济的发展，环境问题日益突出，以 Malthus 为代表的学者开始逐渐关注人类活动对生态环境的影响。随后，美国生态学家 Commanna 提出技术决定论，强调技术进步对于环境污染的决定性作用。但该理论在当时遭到了诸多学者质疑，以 Ehrlich 与 Holdren 为首的环境学家否定了技术的决定作用，他们认为人口过多是环境恶化的主要成因。然而，由于经济环境的复杂性，随着相关研究的持续开展，单因素研究逐渐无法满足学者需求。1971 年，Ehrlich 和 Holdren 首次针对环境的多方驱动因素建立模型，将人口、富裕水平与技术水平纳入同一方程进行研究，如式 (3.1) 所示。

$$I = PAT \quad (3.1)$$

其中， $I$  表示环境压力， $P$  表示人口因素， $A$  表示富裕程度， $T$  表示技术水平。该模型通过量化，反映了人为因素与环境污染的相互关系，为之后的相关研究做出巨大贡献。

然而，随着研究的不断推进，部分学者发现该模型具有很强的局限性：其一，该模型隐含了驱动因素权重相同的假设，也即人口、经济与技术对环境具有同样的作用效果。这与现实经济环境严重不符。对于发达国家而言，经济与技术对环境的影响程度相对较大，而在部分发展中国家，人口因素起到最主要的作用。其二，随着时间的推移，学者发现生态环境相对复杂，仅仅探讨这三因素对环境的影响难以全面了解生态环境现状。大量经验研究也认为政策环境与产业结构等诸多方面都能对环境产生影响。

为了克服经典的 IPAT 等式的局限性，Dietz 和 Rosa (1994) 建立了 STIRPAT 模型，如式 (3.2) 所示。

$$I = aP^bA^dT^fe \quad (3.2)$$

其中， $a$  为常数项， $b$ 、 $d$ 、 $f$  分别为  $P$ 、 $A$ 、 $T$  的弹性系数， $e$  为误差项。当  $a=b=d=f=e=1$  时，STIRPAT 模型即为 IPAT 等式。该模型在 IPAT 等式的基础上进行了拓展，得到了诸多学者的认可。后续学者主要就变量内涵展开讨论：在环境压力方面，主要研究二氧化碳排放、水足迹、PM2.5 与耕地面积变化等内容；在人口因素方面，主要研究人口规模、人口密度以及人口流动等内容；在富裕程度方面，主要探讨人均 GDP、社会总产出等内容；在技术水平方面，主要研究技术进步、R&D 比重等内容。本文根据 STIRPAT 模型对

变量内容进行拓展，其中，I 代表碳排放，P 代表人口密度，A 代表人均 GDP，T 代表技术进步，并将数字经济嵌入人均 GDP 与技术进步中，探讨数字经济发展对城市碳排放的影响。

### 3.1.2 环境库兹涅兹原理

经济发展与环境污染一直备受学界关注。二十世纪五十年代，Kuznets 提出了经济发展与收入分配的倒“U”型曲线理论，受到较多学者的关注与认可。从那之后，该理论被广泛的应用于区域发展与贫富差距等研究领域。1995 年，Grossman 和 Krueger 首次将该非线性理论应用于环境经济领域，他们认为经济发展对环境污染的影响存在先增加，后减少的非线性特征，主张引入经济发展的二次项，检验其与环境污染的倒“U”型关系，如式（3.3）所示。

$$E_t = \beta_0 + \beta_1 Y_t + \beta_2 Y_t^2 + e \quad (3.3)$$

其中， $E_t$  表示环境质量， $Y_t$  表示经济发展， $e$  表示其他控制变量。当  $\beta_2 < 0$ ，且  $\beta_1 > 0$  时，经济发展与环境质量呈现倒“U”型曲线关系，同时存在环境污染的极大值。具体来看，在经济发展前期，环境在不断退化；当经济发展到达拐点时，环境污染程度最严重；当经济发展跨过拐点，污染程度逐渐减轻。随后，国内外学者逐渐拓展了环境研究的相关内容，控制了更多的解释变量，研究雾霾治理、二氧化硫和二氧化碳排放与经济发展的相互关系。

由于现实情况的复杂性，部分学者对环境库兹涅兹倒“U”型曲线的适用性提出质疑。其一，当下的经济结构相比以往具有明显的不同，经济发展对环境质量的影响不一定能够符合经典的曲线形态。在部分阶段出现了 N 型曲线特征（张昭利等, 2012）。其二，在一些研究区域，环境库兹涅兹曲线的特征可能不明显，存在拐点相对偏后与曲线相对平缓的现象。

鉴于数字经济对经济发展的重要作用，本文尝试引入数字经济的多次项，研究数字经济发展与城市碳排放可能存在的非线性关系。

### 3.1.3 新经济地理学理论

从 20 世纪 90 年代开始，新经济地理学蓬勃发展，为当代的区域研究注入了新的活力。以 Krugman 为代表的经济学家将空间因素纳入经济学分析框架，研究经济发展的空间规律，解释现实中存在的空间集聚现象，突破了传统经济学的局限性。此后，该理论

学说逐渐被主流经济学认可。

新经济地理学着眼于区域差异，以规模报酬递增、不完全竞争与冰山交易成本为研究基础，解释区域经济发展规律。Fujita 与 Mori (1996) 基于垄断竞争的概念，提出了“市场潜能曲线”，衡量不同城市的产出差异，进而探讨城市的形成与演化规律，如式 (3.4) 所示。

$$\Omega(r) = \frac{[\omega(r)]^\sigma}{[\omega^*]^\sigma} = e^{\sigma(\mu^A t^A - \mu^M t^M)r} \times \left[ \frac{1-\mu^M}{2} e^{(\sigma-1)t^M r} \Psi(r, f) + \frac{1+\mu^M}{2} e^{-(\sigma-1)t^M r} \right] \quad (3.4)$$

其中， $[\omega^*]^\sigma$  表示中心城市的工资水平， $[\omega(r)]^\sigma$  表示中心城市以外的工资水平，实际市场潜力  $\Omega(r)$  由后者与前者之比构成 ( $r \geq 0$ )。当  $\Omega(r) > 1$  时，劳动力由中心城市向外迁移，从而形成新的城市；当  $\Omega(r) < 1$  时，劳动力由区外向中心城市迁移，扩张了中心城市规模，从而加强了中心城市的集聚效应。该理论不仅能够解释中心城市的形成过程，还能够解释城市消失的原因，从而拓展了区域块状分布的理论研究。

近年来，新经济地理学理论在城市的形成与发展以及异质性方面具有较大进展。其一，城市的形成与发展离不开集聚效应与扩散效应。当一个地区受到外生冲击的影响，该地区的需求分布会发生改变，企业为了生存不得不选择规模较大的市场，降低产品生产成本，从而形成企业集聚区。与此同时，人们为了购买便利，也会选择集聚区生活，进一步扩大中心城市规模。此外，城市集群能够将技术、劳动力不断向外辐射，带动周边城市的发展。其二，由于城市空间资源禀赋和创新能力存在差异，经济活动对不同城市单元的影响具有明显不同。城市规模越大，城市的空间选择效应越强，城市规模效应也就越显著（孟叶和吴浩波, 2023）。同时，地理因素、专业分工与空间外溢等因素均能在不同程度上影响集聚效果，由此循环往复，逐渐形成循环累积因果效应。

鉴于我国具有最适合研究空间经济的环境（梁琦和黄卓, 2012）。本文基于城市视角进行研究，理应将空间因素纳入考量，使得研究结果更贴近我国的真实现状。

### 3.2 数字经济发展影响城市碳排放的理论模型推导

本节主要运用拓展的 IPAT 模型，构造数字经济影响碳排放的理论模型，通过数理模型推导，探讨数字经济发展对城市碳排放的影响效应与内在作用途径。

本文借鉴柏亮和陈小辉 (2020) 的研究，假设在一个完全竞争市场中，存在  $n$  个企业，每一个企业的生产函数如式 (3.5)。其中， $Q$  为企业的产出， $T$  为企业的技术水平， $N$  为劳动投入量， $K$  为资本投入量， $0 < \alpha < 1$ ， $0 < \beta < 1$ 。由于数字经济发展会显著促

进企业技术创新，假定  $T$  为数字经济  $D$  的函数，也即  $T=T_0+tD$ ， $T_0$  为非数字经济引致的技术进步， $t$  为数字经济引致技术进步的敏感度， $0<t<1$ 。

$$Q = T(D)N^\alpha K^\beta \quad (3.5)$$

对于单个企业来说，技术进步会导致企业生产水平提高，而生产效率的提升可能会影响环境。因此，本文借鉴盛鹏飞（2017）的研究，运用 Stokey（1998）的污染因子函数，将数字经济影响单个企业碳排放的函数设定为式（3.6）。其中， $W$  表示单个企业的碳排放程度， $Z$  为碳排放系数，即  $Z=Z_0+zD$ ，其中  $Z_0$  为非数字经济引致的碳排放， $z$  为数字经济引致碳排放的敏感度。

$$W = Z(D)Q \quad (3.6)$$

在完全竞争市场，假定单个厂商的单位商品价格为  $P$ ，单位成本为  $C=C_0+cQ+C_w$ ，包括固定成本  $C_0$ ，可变成本  $cQ$  和碳排放处理成本  $C_w=\gamma W$ ， $0<\gamma<1$ 。单位企业的利润函数为式（3.7）。

$$\pi = PQ - C = P[T(D)N^\alpha K^\beta] - [C_0 + cQ + \gamma W(D)] \quad (3.7)$$

将  $\pi$  针对  $D$  求导，可得式（3.8）。

$$\frac{\partial \pi}{\partial D} = (P - c - \gamma Z)N^\alpha K^\beta t - \gamma z Q \quad (3.8)$$

令式（3.8）等于 0，可以得到在数字经济发展过程中，单个企业的最优生产规模，如下式（3.9）。

$$Q_{max} = \frac{(P-c-\gamma Z)N^\alpha K^\beta t}{\gamma z} \quad (3.9)$$

根据 Dietz 和 Rosa (1994) 建立的 STIRPAT 模型，人口因素、生活富裕、技术水平以及其他因素均会影响城市碳排放，如式（3.10）所示。

$$I = aP^b A^d T^f e \quad (3.10)$$

在完全竞争市场，社会总产出取决于所有企业的最优生产规模，也即生活富裕度可以用  $A = \frac{nQ_{max}(D)}{M}$ （ $M$  为人口总数）表示，同时  $T=T(D)$  为技术水平， $P$  为人口因素， $e$  为其他因素。这些因素能够共同作用于城市碳排放，从而影响城市碳减排。我们能够发现，在扩展的模型中，数字经济通过生活富裕程度以及技术水平影响城市碳排放，也即经济发展和技术水平可能为数字经济低碳减排的作用途径。

假定城市碳排放的函数表达式为式（3.11）。

$$I = PA(D)T(D)e = nPe \frac{(P-c-\gamma Z)N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} (T_0 + tD) \quad (3.11)$$

将 I 针对 D 求导，可得式 (3.12)。

$$\begin{aligned}\frac{\partial I}{\partial D} &= nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} [(-\gamma z)(T_0 + tD) + (P - c - \gamma Z)t] \\ &= nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} [(P - c) - \gamma(tZ + zT)]\end{aligned}\quad (3.12)$$

由式 (3.12) 可知，数字经济的发展能够影响城市碳排放。同时，由于城市经济活动的集聚与扩散特征，其影响过程可能存在空间溢出效应，故假设式 (3.12) 中数字经济对本地碳排放的影响情况同样适用于其他地区。

令式 (3.12) 为 0，可得式 (3.13)。

$$D_0 = \frac{-\gamma z T_0 + (P - c - \gamma Z)t}{2\gamma z t}\quad (3.13)$$

将式 (3.12) 再次针对 D 求导，可得式 (3.14)。

$$\frac{\partial^2 I}{\partial D^2} = nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{\gamma z} (-3\gamma z t)\quad (3.14)$$

由式 (3.14) 可知，因为各变量系数均大于 0，所以  $\frac{\partial^2 I}{\partial D^2} < 0$ ，也即存在一个数字经济发展水平使得城市碳排放最大。当  $D < D_0$ ，数字经济的发展能够导致碳排放增加，当  $D_0 \leq D$ ，数字经济的发展能够促使碳排放减少，也即数字经济影响城市碳排放的过程存在先上升，后下降的非线性特征，该理论结果与环境库兹涅兹理论的作用原理相一致。故本文提出研究假设一：

H1：数字经济影响城市碳排放的过程存在先增加后减少的倒“U”型特征，且其影响过程存在空间溢出效应。

将式 (3.12) 写为全微分形式，可得式 (3.15)。

$$\begin{aligned}dI &= nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} [(P - c) - \gamma(tZ + zT)] dD \\ &= nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} (P - c)dD - nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} \gamma(tZ + zT) dD\end{aligned}\quad (3.15)$$

在式 (3.15) 右侧第一项中， $t dD$  表示数字经济带来的技术进步， $N^\alpha K^\beta t dD$  表示数字经济引致的企业生产率提升程度， $P - c$  表示企业生产单位产品的利润（不含固定成本与碳排放处置成本）。当数字经济发展水平增加  $dD$ ，企业单位产出所得利润会增加  $N^\alpha K^\beta t(P - c)dD$ ，最终使得城市碳排放增加  $nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M\gamma z} (P - c)dD$ ，也即数字经济的发展能够带来技术进步，提高企业利润，促进经济增长，进而增加城市碳排放。

在式 (3.15) 右侧第二项中， $N^\alpha K^\beta t Z dD$  表示数字经济作用下，单位企业产出增加

引致的碳排放量， $N^\alpha K^\beta \gamma t Z dD$ 表示碳排放处理成本的增加幅度，当数字经济发展 $dD$ ，企业单位产出引致的碳排放成本增加 $N^\alpha K^\beta \gamma t Z dD$ ，而碳排放处理成本的增加会减少企业产品的相对价格，最终减少城市碳排放总量 $nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M_{yz}} \gamma t Z dD$ 。同理，数字经济变动引致技术水平变化后，产出水平增加导致碳排放处理成本增加 $N^\alpha K^\beta \gamma z T dD$ ，从而使城市碳排放减少 $nPe \frac{N^\alpha K^\beta t}{M_{yz}} \gamma z T dD$ ，也即数字经济发展能够促进技术进步，提升产出水平，增加企业碳排放处置成本，最终使得城市的排碳量下降。

通过分解式（3.15），可以发现数字经济受到经济发展与技术进步的作用，增加企业利润与提升企业成本，最终影响城市排碳量。该模型推理结果与李治国和王杰（2022）的分析相吻合。故本文提出研究假设二：

H2：经济发展和技术进步是数字经济发展影响城市碳排放的重要路径。

结合式（3.14）可知，数字经济对碳排放的影响先促进，后抑制，即数字经济对碳排放的利润促进作用在开始占据主导地位，随着时间的推移，数字经济对碳排放的成本抑制作用逐渐显现。下文将继续分析数字经济影响城市碳减排的正向和负向作用，并探讨数字经济对城市碳减排的作用路径。

### 3.3 数字经济发展影响城市碳减排的效应分析

新经济地理学认为城市经济兼具集聚效应与扩散效应。互联网、人工智能与平台经济能够加剧这种影响效应，使数字经济凭借新技术、新要素与新基建，为城市经济的发展“添砖加瓦”，成为城市发展的新动能。本小节从效应分析入手，深刻剖析数字经济对城市碳减排的促进与抑制作用，同时探讨经济发展与技术进步影响碳减排的作用机理，如图 3.1 所示。

#### 3.3.1 数字经济发展影响城市碳减排的正向促进作用

在正向促进作用中，数字经济可以通过集聚效应与结构效应作用于城市碳减排。其中，集聚效应是指某一地域经济活动与相关产业要素集中而产生的效应，是我国城市发展的内在动能。数字经济能够带动传统产业与新兴产业集聚，促进资本、技术与人才集中。其一，通过产业集群，企业能够共享数字信息技术，提升能源利用效率，减少大量能源消耗，进而减少城市碳排放。其二，通过共享 5G 基站、互联网与大数据中心等新型基础设施，数字经济可以发挥集群效应优势，形成范围经济与规模经济，减少企业固

定资产投资与生产要素投入，削减企业的生产成本，从而达到减排目的。其三，高新技术产业集聚能够带动周边制造业向信息化、智能化转型，同时打造具有竞争型的横向产业链与具有专业化分工的纵向产业链，通过引进清洁能源，改良生产线，从产业源头保护生态环境，助力数字经济与绿色经济协同发展。

对于结构效应而言，数字经济能够通过城市资源要素的重新配置，调整产业结构与能源结构，减少资源浪费与环境污染。具体表现为：产业结构中第三产业比重持续增高，第二产业中高耗能制造业向清洁型制造业转型，以及第一产业与数字技术深度融合，形成智慧农业新业态。数字经济发展能够增加三大产业的科技投入，使传统产业向数字化产业转型，减少产业的实际耗能。例如，智慧城市试点通过大数据科学布局教育、医疗、产业与交通等资源，能够助益社会低碳减排。就能源结构来说，数字经济的发展能够减少煤炭在能源消费中的比重，以大数据实时观测能源消耗情况，并利用数字化手段扩大新型清洁能源的使用场景。由此可见，数字经济发展能够发挥结构效应促进城市低碳减排。

### 3.3.2 数字经济发展影响城市碳减排的负向抑制作用

在负向抑制作用中，数字经济发展能够通过扩散效应与财富效应抑制城市碳减排。扩散效应是指当经济发展到一定程度时，城市会扩张其现有规模，促使资金、技术与人才外溢的现象。数字经济的发展能够以其网络效应加速这种扩散过程，使周边地区体会到中心城市技术外溢的正外部性。然而，数字技术的外溢首先表现为数字化建设的增加与生产规模的扩张，势必会加剧周边地区的资源消耗。同时，数字经济发展会促使中心城市将某些高耗能产业向外围区域转移，增加周边二氧化碳排放，进一步影响城市碳减排。

就财富效应而言，随着数字经济的发展，数字金融能够打破时空限制，凭借大数据与平台经济等，为广大企业和居民提供便利的资金融通渠道，提升社会平均收入水平。对于企业而言，数字金融能够助力企业融资。企业取得相应的资金后，会购买机器与厂房设备，扩张原本的生产规模，进而增加能源消费。对于居民而言，数字经济发展能够减少流动性约束，方便居民合理分配个人财产，提高民众的收入水平。由于数字金融的包容性与普惠性特征，即使处于偏远地区的民众仍可以享受金融服务，提升实际货币余额。一旦人们增加了可支配收入，大部分居民便会增大生活消费与能源消费支出，如购买私人交通工具，增加电力能源使用等。可见，数字经济的发展能够通过财富效应抑制

城市碳减排。

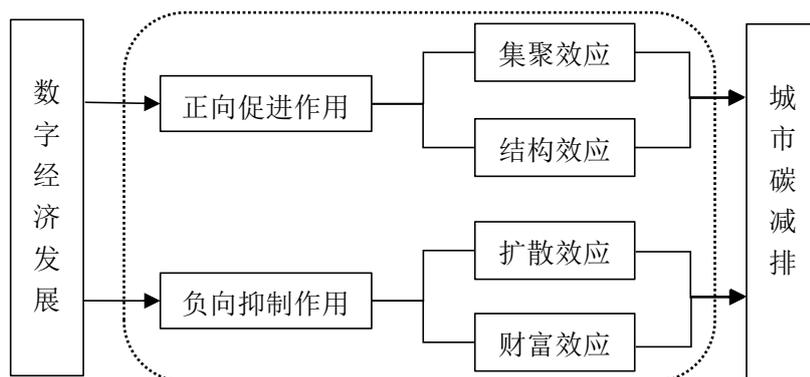


图 3.1 数字经济发展对城市碳减排的影响效应

### 3.3.3 数字经济发展影响城市碳减排的重要作用路径

数字经济发展通过建立数字基础设施，营造数字金融环境，助推数字产业发展。这不仅激发了城市活力，还为城市碳减排提供了作用途径。前文已从数理推导与效应分析角度，探讨了数字经济发展对城市碳减排的影响。本小节从经济发展与技术进步两方面入手，具体阐述数字经济发展影响城市碳减排的作用路径，如图 3.2 所示。

#### （1）路径一：经济发展

在经济发展方面，数字经济发展能够受到经济发展的作用，进而影响城市碳排放。一方面，经济发展能够提升企业的全要素生产率，助力数字经济低碳减排。另一方面，在经济持续发展的同时，会增加以煤为主的能源消耗，从而增加碳排放。对于企业来说，经济发展为企业提供了丰富的机会，能够增加企业的生产利润。因此，企业不仅会扩大生产规模，而且会增加能源要素投入。对于居民来说，数字经济主要通过财富效应，提升居民生活品质，进而使居民增加能源消费。企业与居民能源消耗的增加，最终会导致社会二氧化碳排放的增多，也即数字经济可能受到经济发展的影响，提升城市碳排放水平。

#### （2）路径二：技术进步

在技术水平方面，数字经济发展会引致技术进步，促进生产要素合理配置，加速相关产业集聚。但对于碳排放而言，技术进步具有双重性。一方面，技术进步不仅能够通过提高企业的能源利用效率，提升碳排放效率，降低碳排放水平，而且能够引致产出水平增加，提高碳排放处理成本，倒逼企业低碳减排。另一方面，技术进步所带来的高碳排放效率可以有效降低能源服务价格，促使企业增加能源消费，进而增加碳排放。因此，依靠技术进步的碳减排可能出现回弹效应，从而达不到预期碳减排目标（杨莉莎等，

2019)。

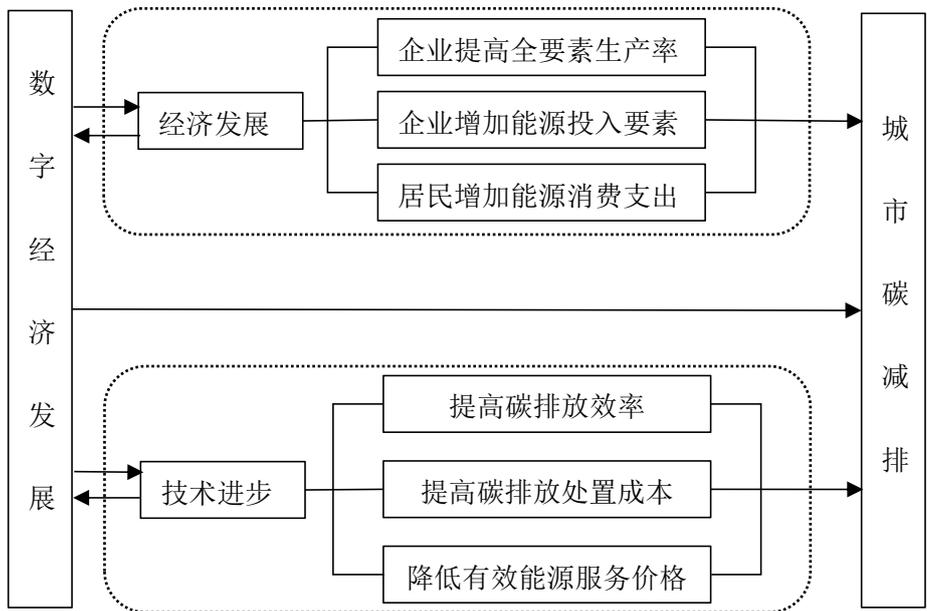


图 3.2 数字经济发展对城市碳减排的重要作用途径

上述研究通过构建纳入数字经济的理论模型，推导出数字经济发展与城市碳排放的相互关系，并从四大效应和两条作用途径方面阐述了数字化发展对城市碳减排的影响。下文将对数字经济与碳排放进行测度，然后通过探索性空间分析法研究两者的空间分布现状与空间相关性特征，进一步为实证研究做准备。

## 4 数字经济发展与城市碳排放现状分析

### 4.1 数字经济测度与现状分析

城市层面的数字经济形态不同于以往的经济形态，不仅具有数字经济的信息化特征，而且具有城市经济的集聚与扩散效应，能够将电子信息技术传至实体经济领域，最终影响生态环境。上文已从正向促进与负向抑制两方面，以及技术进步与经济发展两路径，详细阐述了数字经济低碳减排的影响效应与作用机理。为了进一步分析城市层面数字经济的发展现状，全面构建数字经济的指标体系显得极其重要。

#### 4.1.1 数字经济指数构建

数字经济指数（*Dig*）需要能够全面而精准地刻画城市维度的数字经济发展现状。参照国家统计局对数字经济内涵的表述，数字经济具有很强的信息技术倾向。数字产业化与产业数字化是数字经济发展的核心内容，而先进的基础设施与良好的金融环境是数字经济发展的前提和保障。鉴于此，本文参照既有研究（赵涛等，2020；柏培文和张云，2021；陈贵富等，2022），从数字基础设施、数字产业发展、数字金融环境三个方面构建我国城市的数字经济指标体系。（详情见表 4.1）。

表 4.1 数字经济指标体系

总指标	一级指标	二级指标
数字经济指数	数字基础设施	每百人互联网用户数（个）
		每百人移动电话用户数（个）
		计算机服务和软件业务从业人员占比
	数字产业发展	人均电信业务收入（元）
		人均邮政业务收入（元）
		数字普惠金融指数——覆盖广度（北京大学）
	数字金融环境	数字普惠金融指数——使用深度（北京大学）
		数字普惠金融指数——数字化程度（北京大学）

本文选取三大维度的八个指标均为正向指标。具体而言，数字基础设施采用互联网用户数、移动电话用户数这两个指标反映互联网与电子信息发展水平；数字产业发展主要采用计算机和软件业务从业人员占比、人均电信业务收入与人均邮政业务收入三个指标衡量数字产业化与产业数字化的发展规模；数字金融环境反映了产业数字化中的服务业数字化，主要采用数字普惠金融指数（郭峰等，2020）予以表征，具体包括覆盖广度、

使用深度与数字化程度三个方面。

#### 4.1.2 数字经济测度

为了避免主观赋权法的测度偏差，本文采取客观赋权法中的熵值法对数字经济发展进行测度。熵值法能够依照信息熵的大小客观赋值，信息熵越小，富含信息越多，客观赋值权重就越大，从而能够综合评价不同指标对数字经济的重要程度。

由于二级指标的单位有所不同，在指数合成之前，首先要对相关指数进行无量纲化处理，使得相应指数能够横向比较，具体方法如式（4.1）与式（4.2）所示。

首先，对数据进行标准化处理。

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} + 0.001 \quad (4.1)$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{max} - x_{ij}}{x_{max} - x_{min}} + 0.001 \quad (4.2)$$

其中， $x_{ij}$ 表示原始指标， $x_{max}$ 与 $x_{min}$ 分别表示指标 $x_{ij}$ 的最大值与最小值，式（4.1）与式（4.2）分别表示对正向与负向指标进行标准化处理。标准化指标处理后的取值范围为[0,1]，当标准化以后的指标为0时，需要加上0.001调节指标偏移幅度。

其次，需要计算指标比重。式（4.3）表示 $j$ 指标在 $i$ 区域的占比。

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (4.3)$$

再次，如式（4.4）所示，进行 $j$ 指标的熵值计算。

$$e_{ij} = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_i \ln(p_{ij}) \quad (4.4)$$

接着，计算 $j$ 指标的信息差异，并做归一化处理，得出 $j$ 指标权重，如式（4.4）

$$w_j = \frac{g_j}{\sum_{i=1}^m g_j} \quad (g_j = 1 - e_j) \quad (4.4)$$

最后，计算得出最终的评分结果。

$$M_i = \sum_{j=1}^m w_j x'_{ij} \quad (4.5)$$

本文通过从下级到上级逐级计算，得出三个一级指标与八个二级指标的计算权重，各权重分布如表4.2所示，最终依靠权重得出各城市的数字经济总指标（具体数据见附录）。其中数字产业发展的权重最大，数字金融环境的权重最小，表明数字产业发展对于数字经济指数的贡献度最高，数字产业发展是数字经济的核心内容。由测算的指数可

知，2020年数字经济指数在0.30以上的城市有18个，按照指数从高到底的顺序排列，分别为深圳市、北京市、杭州市、广州市、上海市、厦门市、珠海市、南京市、郑州市、揭阳市、东莞市、济南市、西安市、武汉市、无锡市、中山市、大连市和成都市。

表 4.2 熵值法计算数字经济的指标权重

总指标	一级指标		二级指标	
	基本方面	权重	具体内容	权重
数字经济指数	数字基础设施	0.22	每百人互联网用户数（个）	0.41
			每百人移动电话用户数（个）	0.59
			计算机服务和软件业务从业人员占比	0.28
	数字产业发展	0.62	人均电信业务收入（元）	0.65
			人均邮政业务收入（元）	0.07
			数字普惠金融指数——覆盖广度（北京大学）	0.33
	数字金融环境	0.16	数字普惠金融指数——使用深度（北京大学）	0.34
			数字普惠金融指数——数字化程度（北京大学）	0.32

### 4.1.3 数字经济现状分析

本文运用 ArcGis10.7 绘制了 2011-2020 年 279 个城市的数字经济空间分位图，通过自然间断点法将数字经济水平划分为五个级别，同时使用不同颜色将发展程度进行区分。由于篇幅有限，仅选择 2011、2013、2016 与 2020 年的数据描绘数字经济发展的变化趋势。

由图 4.1 可知，数字经济发展在空间分布上具有明显的异质性特征。具体来看，2011 年处于我国数字经济高速发展的阶段，各研究城市的数字经济发展态势良好，大部分城市的数字经济发展指数在“一般”级别以上。从 2013 年到 2020 年，数字经济发展逐渐走向成熟，数字技术向我国中心城市转移，直辖市与省内主要城市的数字化发展规模明显扩张。与此同时，相较于西北地区，排名靠前的城市绝大部分处于东南沿海区域，数字经济发展呈现“东高西低”的空间分布特征。与经济发展水平相一致，数字经济在东南沿海地区的发展速度更快，发展水平更高，数字基础设施、数字金融环境更好，更有助于企业创设数字型产业，促使数字产业向东南沿海地区聚集。从城市群角度来看，数字经济向京津冀城市群、长江三角洲城市群、长江中游城市群与珠江三角洲城市群集聚，使得这些地区的数字经济总量处于我国前列。兰西城市群与关中平原城市群等数字经济发展较为缓慢，意味着该地区的数字经济仍有很大的发展空间。随着时间的推移，数字经济在各城市平稳发展，为共享数字红利，打破“数字鸿沟”带来了可能。

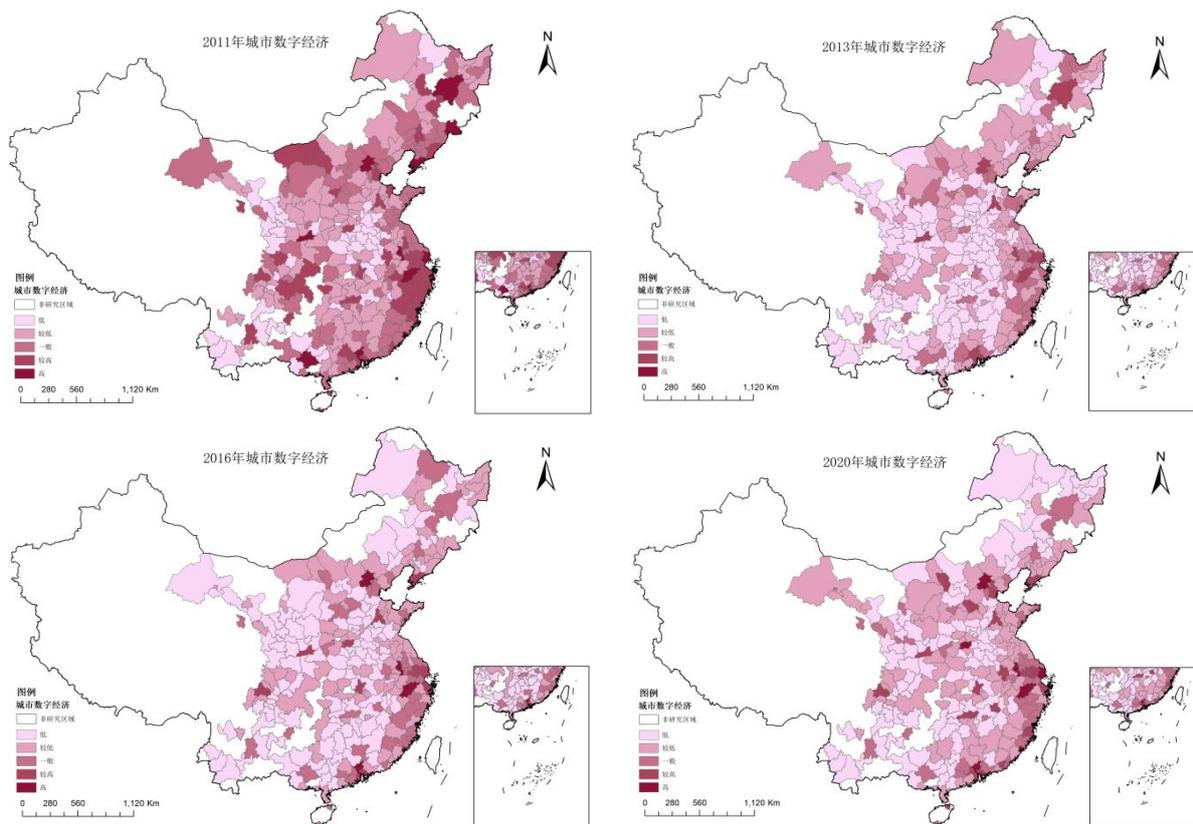


图 4.1 2011、2013、2016 和 2020 年数字经济发展空间分位图

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

考虑到数字经济分指标的空间差异，本文绘制了数字经济一级指标，即数字基础设施、数字产业发展与数字金融环境空间分位图，进一步探究数字经济不同维度的发展现状。由于篇幅限制，只呈现 2011 与 2020 年的空间布局情况。

如图 4.2 所示，数字经济的三大分指标均呈现出临海聚集特征。在数字基础设施方面，随着时间的推移，东北与东南区域的数字基础设施建设增加，中部地区数字基础设施建设减少，中部和西北地区的数字基础设施基本不变。通过比较可以发现，沿海地区的数字基础设施增加幅度显著大于其他地区，中部地区大量基础设施建设向核心城市转移，使核心城市的数字基础建设投入增多，而西北与西南地区除成都市与贵阳市，其他城市的建设水平变化不大，数字基础设施建设相对稳定。总体而言，数字基础设施的空间布局由分散到相对集中，其变化态势与现有研究相吻合。在数字产业发展方面，东北三省与内蒙古自治区的大部分城市的发展水平均存在不同程度的下降，中部地区的数字产业逐渐向郑州市、太原市等地级市集聚，产业发展水平与 2011 年持平，东南沿海地区城市的数字产业发展水平进一步提高，在全国处于领先地位。总的来说，数字产业发展在东北与西北地区仍有很大的发展空间，与发达地区相比还有不小的差距。在数字金

融环境方面,数字金融发展的高水平城市全部集中于东南沿海地区,与经济发展相一致。随着时间的变化,大部分城市的数字金融发展水平有了明显的上升,这表明城市间的数字金融差异有缩小趋势,数字金融环境的改善能够为全国城市的数字经济发展提供有益条件。

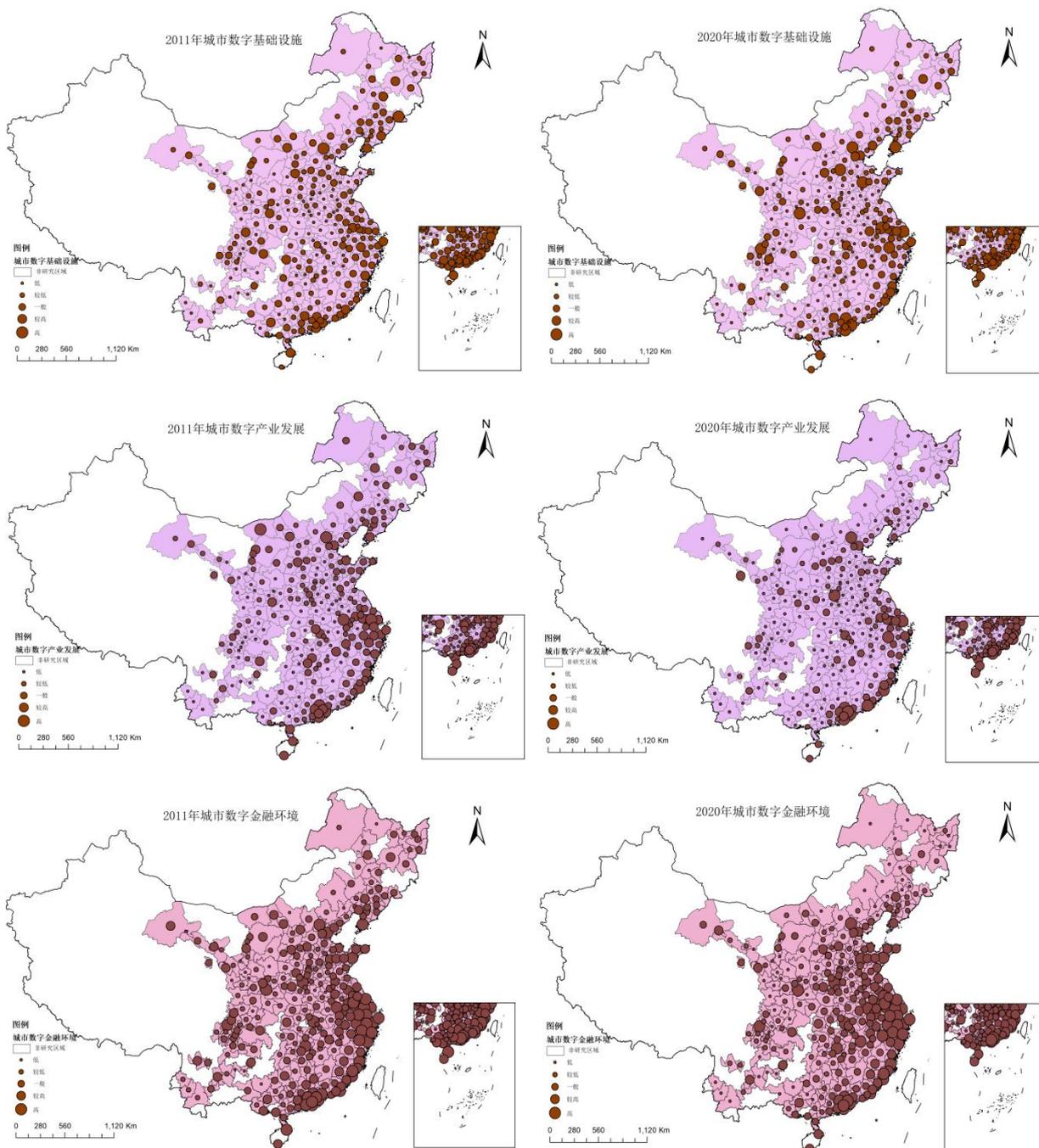


图 4.2 2011 和 2020 年数字经济分指标空间分位图

为了更好地比较数字经济变化倾向,本文绘制了各城市的数字经济总指标与分指标的平均值趋势图。如图 4.3 所示,在 2011 年数字经济总指数的平均值为 0.06,而到了

2020年变为0.20,增长了3倍以上。以2013年为界,2013年之前是数字经济的高速发展期,数字基础设施的建设水平超过了数字经济发展水平。从2013年开始,数字经济进入成熟发展期,数字经济的发展水平开始超越数字基础设施建设水平,此时数字基础设施建设放缓,数字化发展进入常态化发展阶段。通过比较以上三个指标,可以发现数字金融的发展水平最高,数字基础设施建设水平次之,数字产业发展水平最低。这也说明,数字经济依赖前两者的发展空间有限,数字产业发展才是数字经济具有后续发展动力的保障。



图 4.3 2011-2020 年城市维度数字经济总指数与分指数的平均数趋势图

## 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内容,对碳排放的数据进行科学测度能够助力学界进行碳排放的理论研究。然而,当下对于采用何种指标测度碳排放仍有较多争论。因此,本节首先通过分析,采取了大多数学者较为认可的碳排放因子法测算城市碳排放指标,然后根据计算结果绘制了碳排放的空间分布图,期望能为学界的相应理论分析做出边际贡献。

### 4.2.1 碳排放测算

我国的资源禀赋决定了我国长期依赖煤炭的生产现状,以煤为主的能源结构会导致以二氧化碳为主的温室气体大量排放,因此科学构建碳排放衡量指标对于低碳减排具有

重要意义。然而，目前官方的直观排碳量指标难以获取。鉴于此，本文主要参照既有研究（吴建新和郭智勇, 2016; 韩峰等, 2017），从碳排放主要来源，即天然气、液化石油气与社会用电量等能源消费入手，通过 IPCC 提供的碳排放估算方法，计算能源消耗的碳排放总量<sup>①</sup>，具体公式见式（4.6）。

$$Ce = C_1 + C_2 + C_3 = \kappa E_1 + \nu E_2 + \varphi(\eta E_3) \quad (4.6)$$

其中， $Ce$ 反映一定时期内城市碳排放总量， $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 分别表示液化石油气、天然气和煤电消费的碳排放量， $E_1$ 、 $E_2$ 和 $E_3$ 依次表示上述能源的消耗量， $\kappa$ 、 $\nu$ 和 $\psi$ 依次表示上述能源消耗的碳排放折算系数<sup>②</sup>， $\eta$ 表示煤电占比<sup>③</sup>。具体来看，液化石油气的碳排放转化系数 $\kappa$ 为 $3.1013\text{kgCO}_2/\text{kg}$ ，天然气的碳排放转化系数 $\nu$ 为 $2.1623\text{kgCO}_2/\text{m}^3$ ，煤电碳排放转化系数 $\psi$ 为 $1.3203\text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。由于本文是城市层面的研究，考虑到数据的完整性以及操作的可行性，主要运用碳排放强度（ $Cei$ ）即碳排放总量与城市GDP（以2011年平减）的比值对碳排放进行测度，如式（4.7）所示。

$$Cei = \frac{Ce}{GDP} \quad (4.7)$$

为了更好地比较近年来我国能源消费的情况，本文列出了2001-2020年我国能源消费的增长速度，如表4.3所示。

表 4.3 2001-2020 年我国能源消费增速

年份	增长速度	年份	增长速度
2001 年	5.8%	2011 年	7.3%
2002 年	9.0%	2012 年	3.9%
2003 年	16.2%	2013 年	3.7%
2004 年	16.8%	2014 年	2.7%
2005 年	13.5%	2015 年	1.3%
2006 年	9.6%	2016 年	1.7%
2007 年	8.7%	2017 年	3.2%
2008 年	2.9%	2018 年	3.5%
2009 年	4.8%	2019 年	3.3%
2010 年	7.3%	2020 年	2.2%

数据来源：《中国能源统计年鉴》

如上表所示，我国的能源消费总量持续增加，但能源消费增速从2004年以来大幅下降，由16.8%降到了5%以内，近几年一直处于低速增长的态势，能源消费引致的碳排

<sup>①</sup> 由于城市维度的交通数据缺失严重，且交通能耗占比较小，本文在核算碳排放总量时未纳入交通能耗的排碳量。

<sup>②</sup> 天然气与液化石油气的碳排放折算系数来源于中国合同能源管理网 <http://www.china-nengyuan.com/>。

<sup>③</sup> 由《中国电力统计年鉴》可知，2011-2020年的煤电占比分别为：82.45%、78.72%、78.58%、75.83%、73.71%、71.85%、70.99%、70.41%、68.88%、71.19%。

放总量相较前期增长放缓。这表明目前我国在控制碳排放方面具有一定的成效。

#### 4.2.2 碳排放现状分析

为进一步探究碳减排的发展现状，了解碳排放的空间布局具有重要意义。本文发现比较城市碳排放数据不能直观反映空间维度的碳排放现状，因而运用 ArcGis10.7 绘制了 2011-2020 年城市碳排放的空间分位图进行碳排放现状分析。受篇幅限制，仅呈现 2011、2013、2016、2020 年城市碳排放的空间变化趋势。

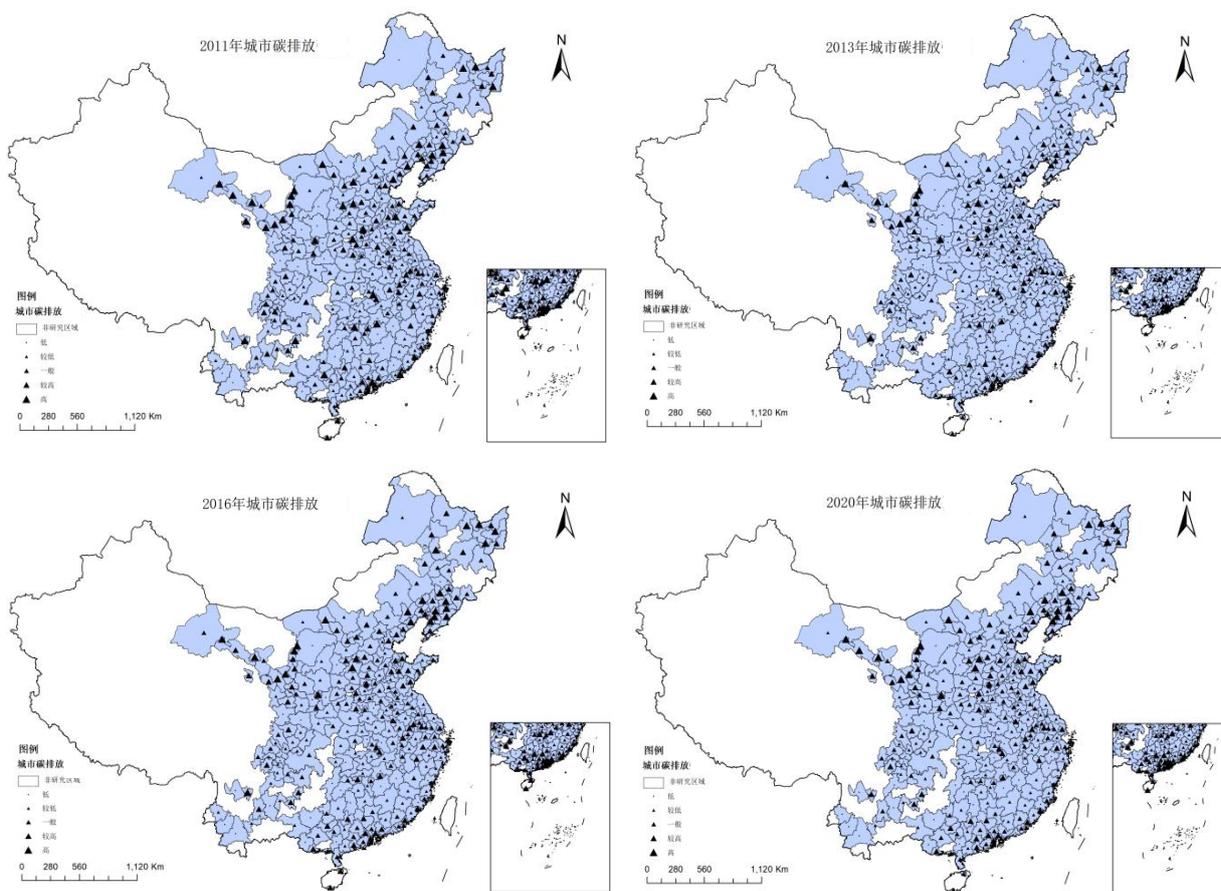


图 4.4 2011、2013、2016 和 2020 年城市碳排放空间分位图

如图 4.4 所示，城市碳排放的分布存在时空分异特征。从空间上看，城市碳排放的强度呈现出“北高南低”“东南聚集”的分布状态。具体表现为，秦岭淮河以北城市的碳排放强度高于全国平均水平，有 32 个城市在研究期间一直处于“高”强度级别，如山西省的太原市、大同市、阳泉市和晋中市，甘肃省的金昌市、白银市和嘉峪关市，内蒙古自治区的包头市和乌海市，东三省的辽阳市、铁岭市、鸡西市，宁夏回族自治区的

石嘴山市和中卫市等。这些城市具有严重的资源依赖倾向，长期以燃煤为主进行生产消费，碳排放强度领先于南部城市。东南沿海地区的碳排放相对密集，排放强度集中于“低”与“较低”级别，如珠江三角洲城市群、长江三角洲城市群的碳排放强度呈现出低密度集聚的空间分布特征。从时间上看，随着时间的推移，在北部地区的高排放城市中，有25%的城市的碳排放强度下降，有10%的城市的碳排放强度出现了不同程度的上升，其余城市的排碳强度基本不变。在南部地区的城市中，有10%左右的城市碳排放强度出现了一定程度的反弹，80%以上的城市碳排强度在低值区稳步下降，这可能与南部地区较为发达的碳交易市场以及大力发展的清洁能源有关。总体来看，近几年我国城市的排碳强度有所降低，表明我国区域的碳减排措施具有一定的成效，这进一步为探究数字经济与碳排放的空间效应奠定了基础。

### 4.3 数字经济发展与城市碳排放的空间相关性分析

开展空间效应分析，首先需要明确其研究对象是否存在空间相关性。当一个空间区域的变量属性与相邻区域的变量属性高度相似，空间区域之间可能存在相互依赖的特征，那么就称这些空间单元存在空间相关性。前文通过初步分析，发现数字经济发展与城市碳排在空间维度存在一定的相关特征。本节进一步运用莫兰指数（Moran's I）和聚类与异常值分析（Anselin Local Moran's I）探讨两者的空间相关性。

空间相关性分析一般采用 Gary's C 和 Moran's I 测量。Gary's C 在局部空间研究中非常敏感，主要通过平方差研究空间区域的不相似性。而 Moran's I 主要通过考察中心地与周围地区的相似性反映空间相关性，也可以通过判断空间集聚效应的显著性来衡量是否需要在面板数据中引入空间因素。在实际研究中，Moran's I 的使用更加广泛。因此，本文主要采用 Moran's I 进行空间探讨，首先采用全局莫兰指数检验数字经济发展与城市碳排放的空间相关性，再运用局部莫兰指数散点图具体反映区域间空间属性的相似度。

$$Moran's I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (4.8)$$

$$Moran's I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (4.9)$$

式（4.8）与式（4.9）分别表示全局莫兰指数与局部莫兰指数的计算方法。其中， $n$  表示空间单元个数， $x_i$  表示第  $i$  个空间单元的变量观测值， $\bar{x}$  表示观测值的均值， $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$  表示样本方差， $w_{ij}$  表示空间矩阵。*Moran's I* 统计量的取值范围为 $[-1,1]$

( $Moran's I_i$ 同理)，当 $Moran's I$ 为正值时，表示有正向的空间自相关或者空间集聚现象；当 $Moran's I$ 为负值时，表示有负向的空间自相关或者空间分散现象；当 $Moran's I$ 为0表示在空间上随机分布；当 $Moran's I$ 为1表示具有完全空间集聚现象；当 $Moran's I$ 为-1表示具有完全空间分散现象。计算出的 $Moran's I$ 指数需要进行假设检验，从而判断城市维度的数字经济与碳排放在统计意义上的显著性。

由于空间近邻矩阵具有强外生性，易于理解和观察，本文选取空间近邻矩阵对数字经济发展与城市碳排放进行空间相关性检验，检验结果如表 4.3 所示。

表 4.3 数字经济发展与城市碳排放的全局空间相关性检验

年份	数字经济发展			城市碳排放		
	Moran's I	Z 值	P 值	Moran's I	Z 值	P 值
2011	0.2747	6.9560	0.0000	0.1691	4.2672	0.0000
2012	0.2398	6.0953	0.0000	0.1486	3.7635	0.0002
2013	0.3109	8.8277	0.0000	0.1598	4.0443	0.0001
2014	0.1995	5.1080	0.0000	0.1967	4.9589	0.0000
2015	0.2512	6.3825	0.0000	0.2663	6.6689	0.0000
2016	0.2544	6.4879	0.0000	0.3047	7.6346	0.0000
2017	0.2440	6.2292	0.0000	0.3181	7.9789	0.0000
2018	0.2156	5.5136	0.0000	0.3273	8.2265	0.0000
2019	0.2111	5.4041	0.0000	0.3365	8.4910	0.0000
2020	0.2455	6.2642	0.0000	0.3095	7.8021	0.0000

由表 4.3 可知，2011—2020 年我国数字经济发展和城市碳排放的全局 $Moran's I$ 均为正值，表明数字化发展与城市碳排放分布存在正向的空间自相关性。同时，数字经济指数与城市碳排放指数均达到了 0.01 的显著性水平，说明两者在城市维度的空间集聚现象十分明显，这与前文的现状分析高度吻合，表明本文能够将空间相关要素引入后文的相应研究中。

研究变量的整体空间相关性特征能够通过全局空间相关性表示，但局部城市单元的非典型特征可能被忽略，因此进行数字经济发展和城市碳排放的局部空间相关性检验很有必要。本文采用 Moran's I 散点图，检验局部城市是否存在空间聚集性。Moran's I

散点图能够直观显示数字经济发展与城市碳排放的拟合优度，同时判断数据是否存在异常值，总共分为四个象限：第一象限表示Moran's  $I_i$ 的高值被高值环绕（H-H）；第二象限表示Moran's  $I_i$ 的低值被高值环绕（L-H）；第三象限表示Moran's  $I_i$ 的低值被低值环绕（L-L）；第四象限表示Moran's  $I_i$ 的高值被低值环绕（H-L）。当Moran's  $I_i$ 为正时，表示发展程度相近的地区相邻（H-H 或 L-L）；当Moran's  $I_i$ 为负时，表示发展程度相悖的地区相邻（L-H 或 H-L）。本文绘制了2011、2013、2016 与 2020 年的数字经济发展与城市碳排放的 Moran's I 散点图，如图 4.5 与图 4.6 所示。

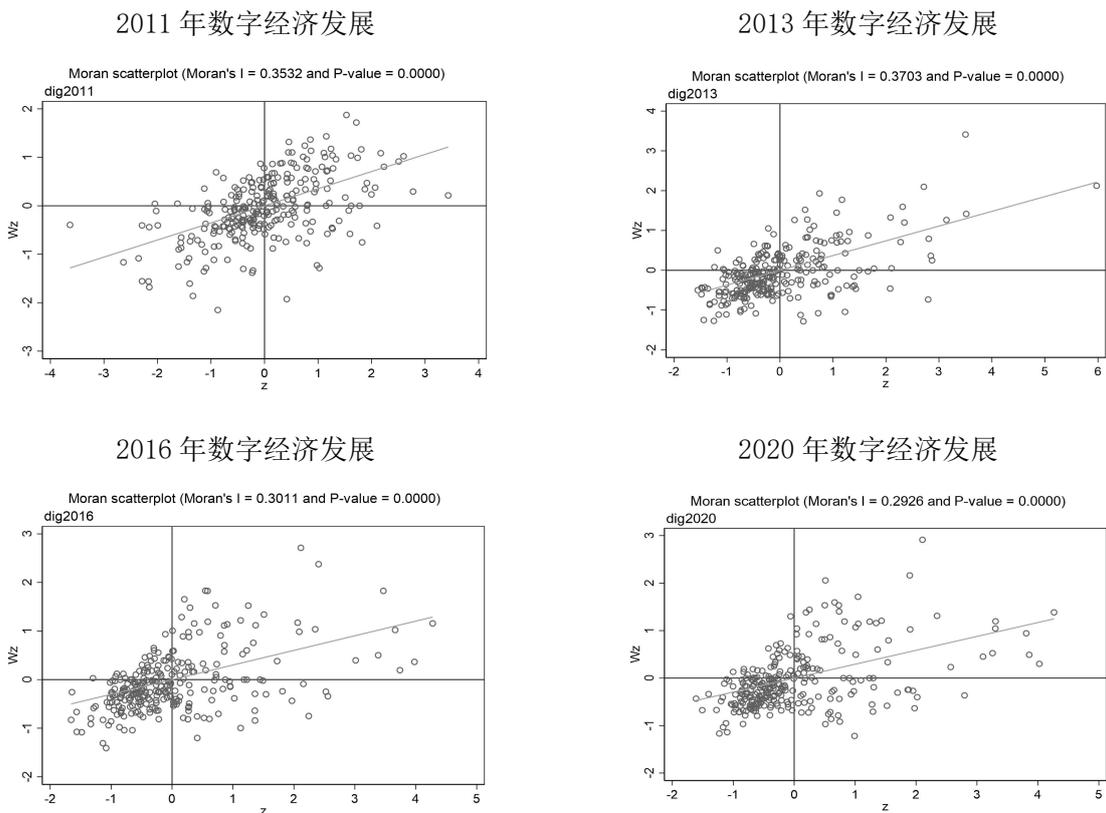
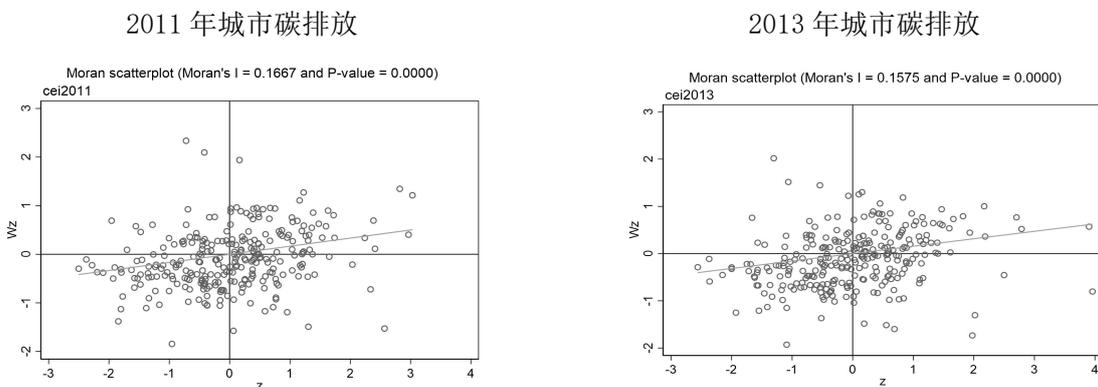


图 4.5 数字经济发展的 Moran's I 散点图



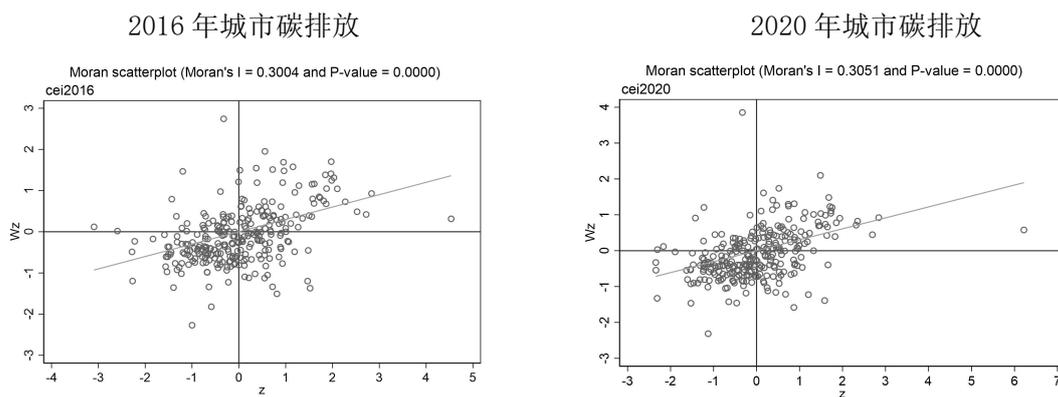
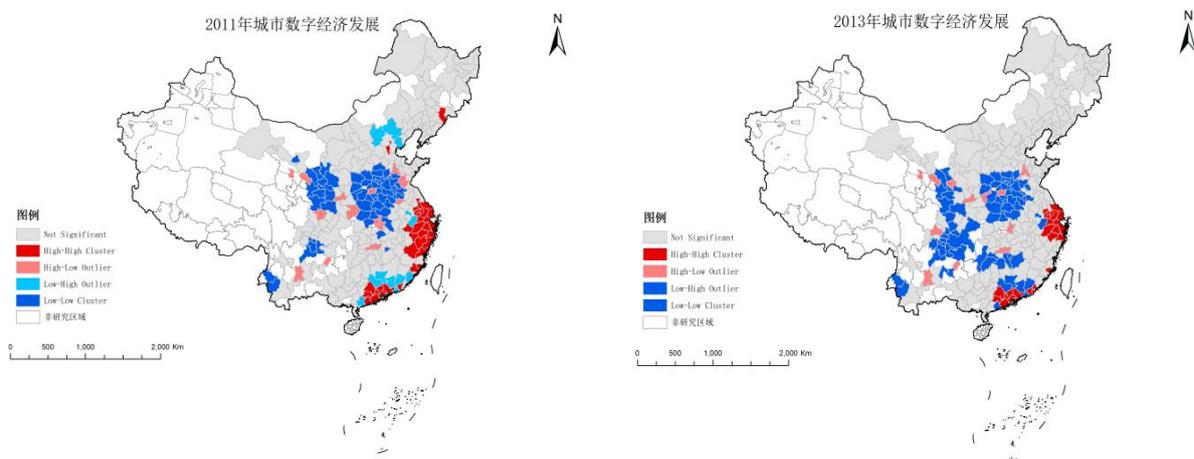


图 4.6 城市碳排放的 Moran's I 散点图

在图 4.5 中，可以看到数字经济发展主要分布于第一象限 (H-H) 与第三象限 (L-L)， $Moran's I_i$  为正值，也即单个城市单元被发展程度相似城市单元包围。随着时间的推移，在这两个象限中城市明显增多，占到了城市总数的 75% 以上，城市维度的数字经济发展的呈现出明显的二元空间集聚现象。

如图 4.6 可知，城市碳排放主要分布于第一象限 (H-H) 和第三象限 (L-L)，碳排放强度相似的城市相互包围。随着环境的变迁，第一象限的高碳排放城市数量大幅减少，第三象限的低碳排放城市数量大幅增加，表明我国城市碳排放逐渐呈现出低值环绕低值的空间相关性。

进一步基于 Anselin Local Moran's I 方法绘制 LISA 集聚图，分析数字经济发展与城市碳排放的空间集聚现状。Anselin Local Moran's I 方法能够有效识别空间异常值，即高值与低值 (H-L) 或低值与高值 (L-H) 环绕的空间数据，具有广泛的使用场景。



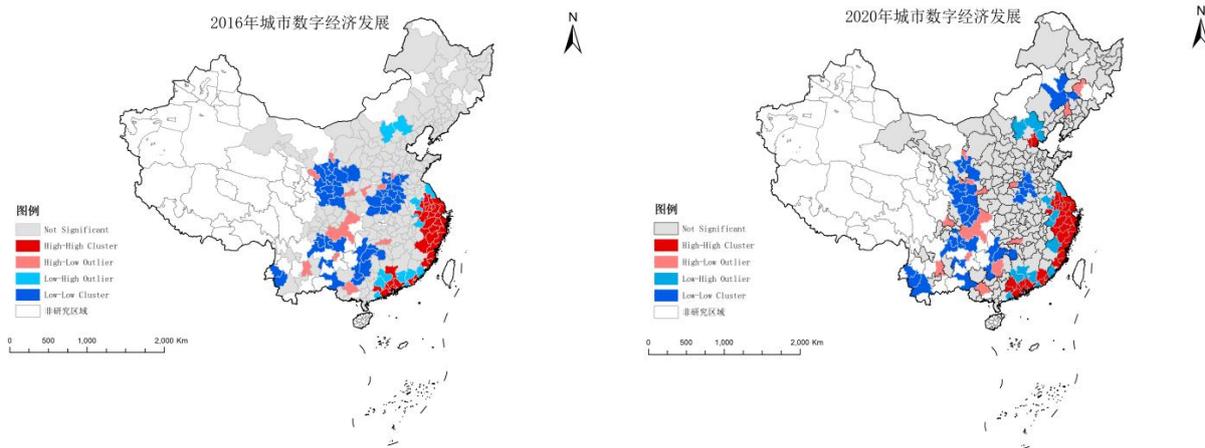
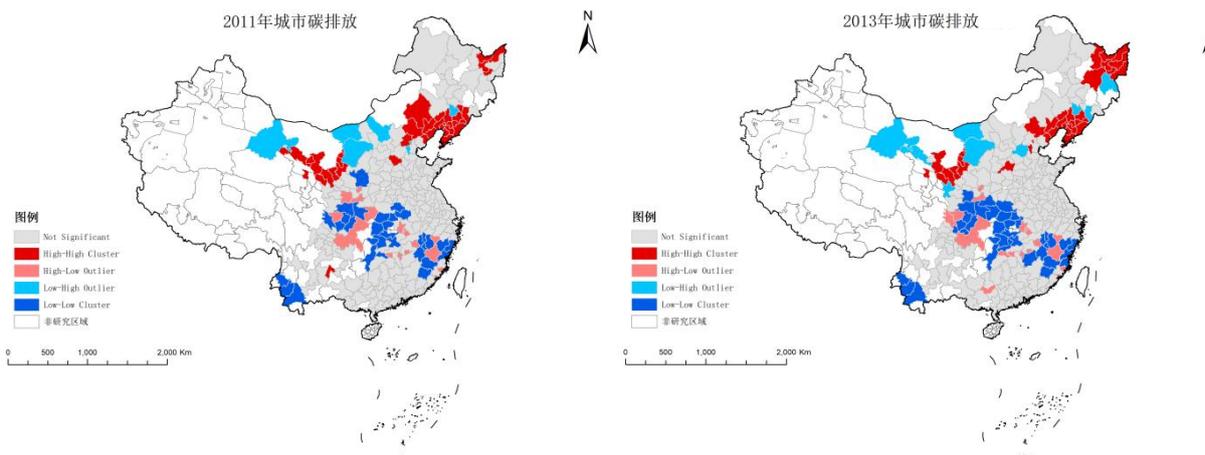


图 4.7 数字经济发展的 LISA 聚集图

如图 4.7 所示，数字经济发展的低值聚集区主要位于东南沿海区域，该区域的城市数字经济规模更大，数字产业发展势头更足，在研究期间，该集聚区域呈现连片扩张的趋势；低值集聚区主要位于西北、西南和中部地区，随着时间的推移，中部地区低值区范围大幅缩小；高值由低值围绕的集聚区相对分散，主要位于西南地区；而低值由高值围绕的集聚区主要分布在北京以北和东南沿海以西的周边城市。值得注意的是，成都市、重庆市与贵阳市等城市于 2016 年由原来的“L-L”动态跃迁至“H-L”区。总体上看，我国城市的数字经济集聚表现出明显的空间块状特征，东部区域的数字经济发展走在全国前列。



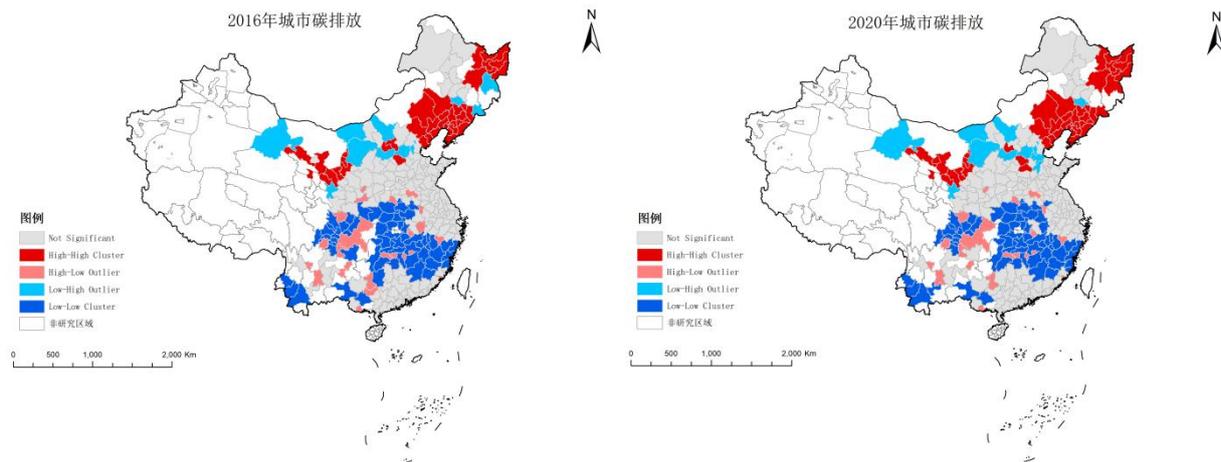


图 4.8 城市碳排放的 LISA 聚集图

如图 4.8 所示，我国城市碳排放的高聚集区主要处于北部区域，如甘肃省、内蒙古自治区、辽宁省与黑龙江的部分城市，这些城市大部分位于煤炭生产大省，碳排放强度领先全国；低集聚区主要分布在中部与东部区域，该区域内的城市在清洁型能源使用方面较为成熟，能够带动相邻地区节能减排，因而碳排放强度远远低于其他地区；高值由低值环绕的集聚区主要分布在中部的低集聚区周围，集聚区域面积相对较小；而低值由高值环绕的区域主要分布于北部区域的部分城市，表明北部的部分城市开始重视低碳减排问题。总的来看，在样本考察期内，我国的城市碳排放在空间上呈现明显的“核心—边缘”特征，符合前文的相关论述。

#### 4.4 本章小结

通过对城市维度的数字经济与碳排放指标进行测度，以及运用探索性空间分析方法对两者的现状进行分析，本文发现：（1）我国数字经济的发展程度在东部地区高于其他地区，在数字基础设施、数字产业发展与数字金融环境方面均领先于全国，呈现出“东高西低”的空间分布特征。（2）在 Moran's I 散点图中，绝大部分城市处于第一象限与第三象限，表明数字经济集聚具有明显的空间二元分化现象。（3）研究期间，数字经济高值集聚区逐渐扩张，低值集聚区逐渐减少，集聚区间动态跃迁，表明中心城市的数字化发展对周边城市具有正向促进作用。（4）我国城市的碳排放在北部地区的排放强度高于南部地区，呈现出“北高南低”的空间分异性。（5）在 Moran's I 散点图中，大部分城市处于第一象限和第三象限，表示城市碳排放的分布具有正向的空间相关性特征。（6）随着社会的发展，城市碳排放的低值集聚区明显扩张，高值集聚区有所缩小，

表明低碳城市能够带动周边城市节能转型，同时区域之间具有较为明显的“核心—边缘”空间特征，体现了空间经济学的块状分布结构。

经过上文的研究分析，本文发现：数字化程度较高的城市碳排放相对较低，由此初步得出数字经济发展对城市碳排放可能存在一定的负向影响效应，也即数字经济发展程度较高的集聚区更能助力城市低碳减排。换句话说，在某一发展阶段，数字经济可能具有正向环境效应助益城市绿色发展，该论述与上文的文献综述和理论探讨相一致。

本部分的现状分析为下文在实证检验中引入空间因素奠定了基础，同时也为构造空间计量模型，分析数字经济发展对城市碳减排的空间溢出效应、作用途径以及空间异质性提供了现实依据。

## 5 数字经济发展影响城市碳减排的实证分析

### 5.1 数据、变量与模型

#### 5.1.1 数据来源

鉴于数据的可得性与完整性,本文制备了2011—2020年全国279个地级市及以上城市的面板数据,进行数字经济影响碳排放的实证检验与分析,各变量指标相关数据均来源于历年《中国城市统计年鉴》《中国电力统计年鉴》《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》和CNRDS数据平台以及北京大学数字普惠金融指数等,并利用移动平均插值法补充缺失数据。由于缺失数据较少,可以认为插补后的整体数据能够反映真实情况。需要注意的是,本文的研究范围不包含我国的港澳台地区;同时由于三沙市、儋州市、钦州市、毕节市、铜仁市、海东市、吉林市、绥化市以及西藏自治区和新疆维吾尔自治区数据缺失严重,故此样本中不包括上述城市和地区,最终制备了279个地级市及以上城市<sup>①</sup>10年的面板数据共2790个样本进行实证分析。

<sup>①</sup> 根据国家统计局的划分标准,本文选取了279个地级市及以上城市,其中东部地区86个城市:北京市、天津市、承德市、张家口市、唐山市、秦皇岛市、廊坊市、保定市、石家庄市、衡水市、沧州市、邢台市、邯郸市、上海市、南京市、无锡市、徐州市、常州市、苏州市、南通市、连云港市、淮安市、盐城市、扬州市、镇江市、泰州市、宿州市、杭州市、宁波市、湖州市、嘉兴市、金华市、丽水市、衢州市、绍兴市、台州市、温州市、舟山市、莆田市、宁德市、南平市、三明市、龙岩市、漳州市、泉州市、厦门市、福州市、济南市、青岛市、淄博市、枣庄市、东营市、烟台市、潍坊市、济宁市、泰安市、威海市、日照市、临沂市、德州市、聊城市、滨州市、菏泽市、广州市、韶关市、深圳市、珠海市、汕头市、佛山市、江门市、湛江市、茂名市、肇庆市、惠州市、梅州市、汕尾市、河源市、阳江市、清远市、东莞市、中山市、潮州市、揭阳市、云浮市、海口市和三亚市;中部地区80个城市:太原市、大同市、阳泉市、长治市、晋城市、朔州市、晋中市、运城市、忻州市、临汾市、吕梁市、合肥市、芜湖市、蚌埠市、淮南市、马鞍山市、淮北市、铜陵市、安庆市、黄山市、阜阳市、宿州市、滁州市、六安市、宣城市、池州市、亳州市、南昌市、景德镇市、萍乡市、九江市、抚州市、鹰潭市、赣州市、吉安市、宜春市、新余市、上饶市、郑州市、开封市、洛阳市、平顶山市、安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市、濮阳市、许昌市、漯河市、三门峡市、南阳市、商丘市、信阳市、周口市、驻马店市、武汉市、黄石市、十堰市、宜昌市、襄阳市、鄂州市、荆门市、孝感市、荆州市、黄冈市、咸阳市、随州市、长沙市、株洲市、湘潭市、衡阳市、邵阳市、岳阳市、常德市、张家界市、益阳市、郴州市、永州市、怀化市和娄底市;西部地区81个城市:呼和浩特市、包头市、乌海市、赤峰市、通辽市、鄂尔多斯市、呼伦贝尔市、巴彦淖尔市、乌兰察布市、南宁市、柳州市、桂林市、梧州市、北海市、防城港市、贵港市、玉林市、百色市、贺州市、河池市、来宾市、崇左市、重庆市、成都市、自贡市、攀枝花市、泸州市、德阳市、绵阳市、广元市、遂宁市、内江市、乐山市、南充市、眉山市、宜宾市、广安市、达州市、雅安市、巴中市、资阳市、贵阳市、六盘水市、遵义市、安顺市、昆明市、曲靖市、玉溪市、保山市、昭通市、丽江市、普洱市、临沧市、西安市、铜川市、宝鸡市、咸阳市、渭南市、延安市、汉中市、榆林市、安康市、商洛市、兰州市、嘉峪关市、金昌市、白银市、天水市、武威市、张掖市、平凉市、酒泉市、庆阳市、定西市、陇南市、西宁市、银川市、石嘴山市、吴忠市、固原市和中卫市;东北地区32个城市:沈阳市、大连市、鞍山市、抚顺市、本溪市、丹东市、锦州市、营口市、阜新市、辽阳市、盘锦市、铁岭市、朝阳市、葫芦岛市、长春市、四平市、辽源市、通化市、白山市、松原市、白城市、哈尔滨市、齐齐哈尔市、鸡西市、鹤岗市、双鸭山市、大庆市、宜春市、佳木斯市、七台河市、牡丹江市和漯河市。

### 5.1.2 变量选取

(1) 被解释变量：碳排放强度 ( $Cei$ )。如上文所述，本文将液化石油气、天然气和煤电消费的碳排放量相加测算碳排放总量，用碳排放总量与地区 GDP 的比值衡量碳减排效果。

(2) 核心解释变量：城市数字经济 ( $Dig$ )。城市数字经济主要包含数字基础设施 ( $Dig1$ )、数字产业发展 ( $Dig2$ ) 和数字金融环境 ( $Dig3$ )，本文运用熵值法从这三方面测度了城市数字经济综合指标，具体计算过程见第四章。考虑到回归结果中可能存在的非线性特征，本文在模型中引入  $Dig$  的二次项考察城市数字经济与碳排放的相互关系。

#### (3) 控制变量

为保证研究结果的科学性与稳健性，本文基于研究目标，借鉴既有成果，选取以下 6 个控制变量纳入实证研究。控制变量分别为经济发展 ( $Ed$ )、技术进步 ( $Tep$ )、人口密度 ( $Pop$ )、环境规制 ( $Er$ )、外商投资 ( $Fdi$ ) 和市场化水平 ( $Mkt$ )，从生活富裕度、技术水平、人口因素等方面，解析城市经济发展对碳排放的影响效应。变量选取情况如表 5.1 所示。

表 5.1 各变量定义及解释

变量类别	变量符号	变量定义	变量解释
被解释变量	$Cei$	碳排放强度	单位 GDP 碳排放的对数值
核心解释变量	$Dig$	城市数字经济	城市数字经济指数
控制变量	$Ed$	经济发展	城市人均 GDP 的对数值
	$Tep$	技术水平	全要素生产率
	$Pop$	人口密度	城市总人口/城市面积
	$Er$	环境规制	环境规制指数
	$Fdi$	外商投资	外商直接投资额的对数值
	$Mkt$	市场化水平	市场化进程总得分

① 经济发展 ( $Ed$ )。考虑到经济发展与环境保护之间关系，本文使用城市人均 GDP 作为代理变量，将经济发展作为重要影响因素纳入碳减排的研究。

② 技术进步 ( $Tep$ )。已有研究表明，技术进步对环境污染具有双重性，因而对碳排放的影响不确定。本文采用 DEA - Malmquist 指数法测度城市全要素生产率，以此作为技术进步的代理变量。其中，产出变量包括以 2011 年为基期进行平减的城市实际 GDP (余泳泽等, 2019; 邱子迅和周亚虹, 2021; 张炎, 2021)。投入变量选取资本存

量与就业人数。资本存量 $K_{ipt}$ 运用式(5.1)永续盘存法计算, 资产投资为 $I_{ipt}$ , 投资指数为 $P_{ipt}$ , 折旧率 $\delta$ 取值为9.6% (张军等, 2004)。

$$K_{ipt} = (1 - \delta)K_{ipt(t-1)} + \frac{I_{ipt}}{P_{ipt}} \quad (5.1)$$

③ 人口密度 ( $Pop$ )。人口密度可以表征人口的空间结构, 也会显著影响碳排放。一方面, 人口密度高的地方通常会带来更大的降碳减碳压力 (Li et al., 2019)。另一方面, 人口集聚能够提升能源利用效率, 促进绿色创新技术的研发与应用, 助力环境治理 (Shao et al., 2017)。本文以城市人口数与每平方千米区划面积的比值作为人口密度的代理变量。

④ 环境规制 ( $Er$ )。部分研究表明环境规制能够直接或间接助力低碳减排, 降低环境的负外部性 (Porter and Linde, 1995; 徐盈之等, 2015)。本文先将城市工业废水排放量、工业二氧化硫排放量与工业烟尘排放量进行标准化, 然后使用调整系数反映排放差异, 最后计算出命令型环境规制指数, 以此作为环境规制的代理变量 (叶琴等, 2018)。

⑤ 外商投资 ( $Fdi$ )。关于外商投资对碳排放的影响研究, 学界有两种截然不同的观点: 其一, 外商投资可能会将高污染企业转置别国, 从而恶化转入国的环境状况 (List and Co, 2000)。其二, 外商投资能够通过提供清洁型技术, 改善转入国的环境条件 (许和连和邓玉萍, 2012)。因而, 外商投资对于碳排放的影响暂不确定。本文选取外商直接投资额的对数值衡量外商投资水平。

⑥ 市场化发展水平 ( $Mkt$ )。市场化发展能够加速生产模式与生产技术升级, 从而降低碳排放程度, 同时也会增加企业产出, 从而增加碳排放水平。本文借鉴省级市场化进程总得分的计算方法 (王小鲁等, 2021), 对地级市的市场进程总得分进行测算, 部分缺失值参照王钰等 (2015) 学者的处理方法加以补充, 预期该回归结果不确定。

(4) 空间权重矩阵。数字经济和碳排放不仅与城市空间是否相邻有关, 还与城市之间的距离有关。考虑到数字经济发展与城市碳排放的空间关联特征, 本文在实证部分主要采用标准化后的反距离空间矩阵进行研究。文章运用 Stata17 软件, 利用我国 279 个城市的经纬度生成各城市的距离倒数空间矩阵。该矩阵具有严格外生性, 便于学者们研究与理解。

本文还进行了多重共线性检验, 其结果展现在描述性统计表中 (如表 5.2 所示), 各变量的方差膨胀因子均小于 10, 均值为 3.13, 表明变量之间不存在多重共线性问题。

为了避免量级差距过大,本文对碳排放强度、经济发展与外商投资变量进行了对数处理。

表 5.2 各变量的描述性统计

变量	观测值个数	均值	标准差	最小值	最大值	方差膨胀因子
<i>Cei</i>	2,790	7.95	0.78	5.43	13.60	—
<i>Dig</i>	2,790	0.15	0.08	0.01	0.88	9.18
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	2,790	0.028	0.04	0.0001	0.77	6.79
<i>Ed</i>	2,790	10.70	0.57	8.77	13.06	2.67
<i>Tep</i>	2,790	1.01	0.03	0.96	1.06	1.02
<i>Pop</i>	2,790	0.11	0.14	0.0002	2.08	1.30
<i>Er</i>	2,790	0.90	0.09	0.28	1.00	1.21
<i>Fdi</i>	2,790	7.24	1.98	-2.21	12.03	1.48
<i>Mkt</i>	2,790	11.76	2.20	4.96	19.16	1.36

由表 5.2 的描述性统计可知,2011—2020 年各城市的数字经济发展存在明显差异,最大值为 0.88,而最小值仅为 0.01。碳排放强度的标准差为 0.78,最大值为 13.60,最小值为 5.43,说明城市之间的碳排放存在空间异质性。此外,其余变量的标准差均相差较大,表明各城市的经济发展、技术进步、人口密度、环境规制、外商投资和市场化水方面存在很大差异,符合我国的发展现状,为后续进行空间分析与机制分析奠定了基础。

### 5.1.3 模型构建

由前文可知,经济活动的空间观测值普遍存在空间自相关性与空间依赖性特征。为廓清数字经济发展影响城市碳排放的空间效应,本文通过构造空间面板模型对变量进行相关分析。空间面板模型主要分为空间杜宾模型(SDM)、空间滞后模型(SAR)与空间误差模型(SEM)。

构造本文的一般空间面板模型如式(5.2)所示:

$$\begin{cases} Cei_{it} = \alpha + \rho \sum W_{it} Cei_{it} + \beta_1 Dig_{it} + \delta_1 \sum W_{it} Dig_{it} + \beta_2 Dig_{it}^2 \\ \quad + \delta_1 \sum W_{it} Dig_{it}^2 + \beta X_{it} + \delta \sum W_{it} X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \\ \varepsilon_{it} = \lambda \sum W_{it} \varepsilon_{it} + v_{it} \end{cases} \quad (5.2)$$

式(5.2)中, $Cei_{it}$ 表示城市碳排放强度的对数值, $Dig_{it}$ 表示数字经济发展的一次项, $Dig_{it}^2$ 表示数字经济发展的二次项, $X_{it}$ 为控制变量,包括经济发展( $Ed_{it}$ )、技术进步( $Tep_{it}$ )、人口密度( $Pop_{it}$ )、环境规制( $Er_{it}$ )、外商投资( $Fdi_{it}$ )与市场化水平( $Mkt_{it}$ ), $W_{it}$ 表示空间权重矩阵。 $\mu_i$ 为个体效应, $\gamma_t$ 为时间效应, $\varepsilon_{it}$ 为随机扰动项。

$\gamma_t = 0$  时，该空间面板模型为静态模型， $\gamma_t \neq 0$  时，该空间面板模型为动态模型。

当  $\lambda = 0$ ，模型为空间杜宾模型（SDM）；

当  $\lambda = \delta = 0$ ，模型为空间滞后模型（SAR）；

当  $\rho = \delta = 0$ ，模型为空间误差模型（SEM）。

根据前文的理论分析，数字经济发展能够受到经济发展和技术水平的作用影响城市碳排放。因此，本文构建如下空间交互效应模型进行路径探讨：

(1) 经济发展路径的空间面板模型

$$\begin{aligned} Cei_{it} = & \alpha + \rho \sum W_{it} Cei_{it} + \beta_1 Dig_{it} + \delta_1 \sum W_{it} Dig_{it} + \beta_2 Dig_{it}^2 + \\ & \delta_2 \sum W_{it} Dig_{it}^2 + \beta_3 Dig_{it} Ed_{it} + \delta_3 \sum W_{it} Dig_{it} Ed_{it} + \beta_4 Dig_{it}^2 Ed_{it} + \\ & \delta_4 \sum W_{it} Dig_{it}^2 Ed_{it} + \beta X_{it} + \delta \sum W_{it} X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5.3)$$

(2) 技术进步路径的空间面板模型

$$\begin{aligned} Cei_{it} = & \alpha + \rho \sum W_{it} Cei_{it} + \beta_1 Dig_{it} + \delta_1 \sum W_{it} Dig_{it} + \beta_2 Dig_{it}^2 + \\ & \delta_2 \sum W_{it} Dig_{it}^2 + \beta_3 Dig_{it} Tep_{it} + \delta_3 \sum W_{it} Dig_{it} Tep_{it} + \beta_4 Dig_{it}^2 Tep_{it} + \\ & \delta_4 \sum W_{it} Dig_{it}^2 Tep_{it} + \beta X_{it} + \delta \sum W_{it} X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5.4)$$

(2) 双重路径的空间面板模型

$$\begin{aligned} Cei_{it} = & \alpha + \rho \sum W_{it} Cei_{it} + \beta_1 Dig_{it} + \delta_1 \sum W_{it} Dig_{it} + \beta_2 Dig_{it}^2 + \\ & \delta_2 \sum W_{it} Dig_{it}^2 + \beta_3 Dig_{it} Tep_{it} + \delta_3 \sum W_{it} Dig_{it} Tep_{it} + \beta_4 Dig_{it}^2 Tep_{it} + \\ & \delta_4 \sum W_{it} Dig_{it}^2 Tep_{it} + \beta_5 Dig_{it} Tep_{it} + \delta_5 \sum W_{it} Dig_{it} Tep_{it} + \beta_6 Dig_{it}^2 Tep_{it} + \\ & \delta_6 \sum W_{it} Dig_{it}^2 Tep_{it} + \beta X_{it} + \delta \sum W_{it} X_{it} + \mu_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5.5)$$

其中， $Dig_{it}Ed_{it}$ 与 $Dig_{it}Tep_{it}$ 分别表示数字经济一次项与经济发展和技术进步的交互项， $Dig_{it}^2Ed_{it}$ 与 $Dig_{it}^2Tep_{it}$ 表示数字经济二次项与经济发展和技术进步的交互项。

## 5.2 数字经济发展对城市碳减排的影响分析

### 5.2.1 模型选择检验

第四章已证明数字经济发展与城市碳排放存在空间相关性，为进一步廓清数字经济发展影响城市碳排放的主要机制效应，本节运用 LM 检验、Hausman 检验、LR 检验与固定效应联合检验选择空间计量模型。

表 5.3 模型选择检验

	模型检验	统计量	P 值
LM 检验	LM-Error	383.626	0.000
	稳健 LM-Error	88.006	0.000
	LM-Lag	377.778	0.000
	稳健 LM-Lag	82.158	0.000
LR 检验	原假设：模型能够退化为 SEM	52.93	0.000
	原假设：模型能够退化为 SAR	66.59	0.000
Hausman 检验	原假设：模型通过了随机效应检验	156.48	0.000
固定效应联合检验	原假设：个体固定优于时空双固定	25.69	0.042
	原假设：时间固定优于时空双固定	4860.07	0.000

由表 5.3 结果可知，首先，模型通过了 LM 检测，表明选择空间计量模型更适合本文的研究内容。通过 LR 检验，模型拒绝了退化为 SEM 和 SAR 的原假设，也即 SDM 比 SEM 和 SAR 更适用于数字经济发展与城市碳排放的空间面板模型分析。其次，Hausman 检验表明该 SDM 模型的固定效应优于随机效应。最后，固定效应检验结果拒绝了个体固定效应与时间固定效应优于时空双固定效应的原假设，表明选择时空双固定效应的 SDM 最佳。基于检验结果，本文选取了基于时空双重固定效应的 SDM 进行后续实证研究。

### 5.2.2 数字经济发展影响城市碳减排的空间效应分析

为分析数字经济发展对城市碳排放的影响，本文采用所制备的 2011—2020 年我国 279 个城市的面板数据，使用空间固定、时间固定以及时空双固定 SDM 进行实证检验。为更好地比较不同模型下的影响效应，文章还运用了时空双固定效应的 SEM 与 SAR 解析其作用效果。具体回归结果如表 5.4 所示。

表 5.4 空间面板回归结果

变量	SDM			SAR	SEM
	空间固定	时间固定	双固定		
<i>Dig</i>	2.978*** (6.79)	6.754*** (10.85)	3.207*** (7.27)	2.829*** (6.44)	2.805*** (6.37)
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	-3.517*** (-6.65)	-7.662*** (-8.39)	-3.785*** (-7.10)	-3.357*** (-6.31)	-3.289*** (-6.17)
<i>Ed</i>	-0.383*** (-9.02)	-0.156*** (-5.12)	-0.384*** (-9.01)	-0.453*** (-12.68)	-0.504*** (-14.24)
<i>Tep</i>	-0.00601 (-0.40)	-0.0213 (-0.63)	-0.00859 (-0.57)	-0.00723 (-0.48)	-0.00767 (-0.51)
<i>Pop</i>	-1.981*** (-30.70)	-3.418*** (-42.57)	-1.989*** (-30.75)	-1.969*** (-30.80)	-1.989*** (-30.99)
<i>Er</i>	0.0174 (0.15)	-0.548*** (-4.43)	0.0711 (0.60)	-0.0515 (-0.45)	-0.0440 (-0.38)
<i>Fdi</i>	-0.000847 (-0.14)	-0.0701*** (-9.05)	0.000319 (0.05)	-0.00886 (-1.56)	-0.00938 (-1.61)
<i>Mkt</i>	0.0332** (2.70)	0.00578 (1.05)	0.0391** (3.14)	0.0362** (2.91)	0.0347** (2.79)
<i>W × Dig</i>	-1.401 (-1.32)	-4.770 (-0.82)	13.65* (2.25)		
<i>W × Dig</i> <sup>2</sup>	-1.654 (-0.72)	1.697 (0.18)	-20.21** (-2.85)		
$\rho$	0.312* (2.24)	0.547*** (4.85)	0.483** (2.80)	0.491*** (4.84)	
$\lambda$					0.379** (2.69)
$\sigma^2$	0.0454*** (37.33)	0.257*** (37.22)	0.0451*** (37.34)	0.0458*** (37.30)	0.0461*** (37.32)
N	2790	2790	2790	2790	2790
Log-L	352.5660	-2064.6249	365.4120	338.9453	332.1149
拐点	0.4234	0.4407	0.4236	0.4214	0.4264

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。

表 5.4 回归结果显示：

第一，在空间回归结果中，被解释变量碳排放强度 (*Cei*) 的空间滞后项系数  $\rho$ ，随机扰动项系数  $\lambda$ ，以及随机扰动项标准差的平方  $\sigma^2$  均在 0.01 的水平上显著，同时对数似然函数与拐点的数值较为合理，表明该空间非线性回归模型具有一定的研究意义。

第二，空间计量模型的空间滞后项系数  $\rho$  在 0.05 的水平上显著，表明城市碳排放具有显著空间溢出效应。单个城市单元碳排放行为能够辐射至周边地区，形成中心城市带

动作用，不仅能影响本地碳排放，而且能影响周边城市排碳情况。同样，周边城市的碳排放行为会反过来影响本地。由此循环往复，形成累积式循环发展趋势，再一次验证了碳排放强度的空间相关性特征。

第三，数字经济发展的一次项与二次项系数分别在0.01的水平上显著为正和为负，表明数字经济发展对城市碳排放的影响存在明显的倒“U”型关系，与库兹涅兹曲线相一致。通过观察数字经济发展的空间滞后项系数，能够发现本地数字经济发展对周边城市的影响同样存在倒“U”型关系，从而验证了研究假设H1。基于空间计量回归方程求导，能够得出数字发展影响城市碳排放的拐点值，这表明，在发展初期，数字经济对城市碳排放具有促进作用，而在越过拐点值之后，对碳排放具有明显的抑制作用。进一步考察回归结果的经济意义，能够发现在其他变量不变时，拐点右侧的数字经济每增长1%会使得城市碳排放减少1.79%。这是因为数字经济的发展能够完善城市基础设施建设，营造良好的数字金融环境，加速数字技术与传统产业融合，从而提升企业的碳减排效率。同时，数字技术的革新，增加了企业的碳排放处置成本，从而倒逼企业降低碳排放。随着区域关联日益加深，数字经济发展能够通过集聚效应与结构效应带动周边城市低碳减排，对整个社会的环境改善具有积极意义。

第四，控制变量中：经济发展（*Ed*）在0.01的水平上显著为正，表明在考察期内，经济发展对区域碳减排有促进作用，也即经济发展带来的减排效应大于要素投入和能源消费引致的增排效应。技术进步（*Tep*）与碳排放呈现负相关，但在回归结果中不显著，可能是由于技术进步在环境污染中具有的双重性，使得部分减排效果被抵消，与前文的分析结果相符。人口密度（*Pop*）是影响碳排放最重要的因素之一，在0.01的水平上显著为负。根据回归结果，人口密度每增加1%可使碳排放平均减少7.32%。人口集聚能够带来规模效应，带动产业集群，提升能源利用效率，从而对于碳减排具有积极意义。环境规制（*Er*）与碳排放呈现正相关关系，可能的原因在于环境规制的实施过程存在时滞，在短期会增加能源开采，导致碳排放增加，进而形成“绿色悖论”，减弱对环境的积极影响。外商投资（*Fdi*）一方面能够加剧碳排放，另一方面能够引进清洁型技术，降低碳排放，因而在回归结果中具体效应不明确。市场化水平（*Mkt*）在0.01的水平上显著为正。由回归结果可知，市场化水平每提高1%会增加1.04%的碳排放，表明市场化水平越高越容易造成高碳排放现象，也即市场化水平对环境改善具有一定的消极影响。

第五，表5.4回归结果未能详细地刻画变量间的空间溢出效应，为进一步把握数字经济发展对城市碳排放的空间效应，避免实际系数与估计系数的误差，本文将空间杜宾

模型<sup>①</sup>的效应进行分解。如下表 5.5 所示，空间效应被分解为直接效应、间接效应与总效应。

表 5.5 直接效应、间接效应与总效应分解结果

变量	直接效应	间接效应	总效应
<i>Dig</i>	3.230 <sup>***</sup> (7.12)	15.56 <sup>*</sup> (2.27)	18.79 <sup>**</sup> (2.71)
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	-3.822 <sup>***</sup> (-6.98)	-22.74 <sup>**</sup> (-2.65)	-26.56 <sup>**</sup> (-3.06)
<i>Ed</i>	-0.380 <sup>***</sup> (-9.29)	-0.154 (-0.50)	-0.534 (-1.77)
<i>Tep</i>	-0.00883 (-0.60)	-0.290 (-0.91)	-0.299 (-0.94)
<i>Pop</i>	-1.989 <sup>***</sup> (-32.12)	-2.257 <sup>*</sup> (-2.04)	-4.246 <sup>***</sup> (-3.83)
<i>Er</i>	0.0772 (0.65)	-1.990 (-1.42)	-1.913 (-1.39)
<i>Fdi</i>	0.000132 (0.02)	-0.315 <sup>***</sup> (-3.34)	-0.315 <sup>***</sup> (-3.37)
<i>Mkt</i>	0.0391 <sup>**</sup> (3.28)	0.775 <sup>*</sup> (2.50)	0.814 <sup>**</sup> (2.62)

由表 5.5 结果可知，在空间杜宾模型中，数字经济发展的直接效应、间接效应以及总效应的系数均在 0.1 的水平上显著。从经济意义上来看，在越过阈值以后，数字经济发展每增加 1%，会使得本地的碳排放减排 1.81%，使得周边城市减排 13 倍，表明数字经济的发展不仅能够直接抑制本市碳排放，而且能够通过空间外溢效应显著作用于周边城市低碳减排。从总体上看，间接效应在总效应中所占的比重高达 80%，也即数字经济发展对于周边城市的碳减排作用大于对本地的激励作用。对于经济发展而言，经济发展能够显著促进本地碳减排，但对于周边城市的溢出效应微乎其微。对于人口密度而言，人口密度的增加能够显著减少本城市与周边城市的碳排放水平。对于外商投资而言，外商投资额的增加能够抑制周边城市的碳排放，但对于本地碳排放具有一定的促进作用。而在市场化水平方面，市场化水平均在 0.1 的水平上显著。随着市场化进程不断加深，本城市和其他城市的碳排放水平均有所提高，表明市场化水平提升对碳减排具有负向影响。

<sup>①</sup> 此处使用时空双固定的空间杜宾模型，下同。

### 5.2.3 数字经济发展影响城市碳减排的稳健性检验

为保证研究结果的稳健性,本文首先将空间距离矩阵替换为空间近邻矩阵、经济距离矩阵与经济地理嵌套矩阵进行空间效应分析<sup>①</sup>。其次,考虑到直辖市与地级市之间的经济差异,采取剔除直辖市的方法进行稳健性检验。最后,相较于碳排放强度,人均碳排放量更注重社会碳排放的公平性,因此本文选用人均碳排放作为被解释变量进行探讨,结果如表 5.6 所示。

表 5.6 稳健性回归结果

变量	替换空间权重矩阵			剔除直辖市	替换被解释变量
	空间近邻矩阵	经济距离矩阵	经济地理嵌套矩阵		
<i>Dig</i>	3.207*** (7.27)	3.063*** (7.04)	3.077*** (7.08)	3.093*** (6.85)	2.804*** (6.46)
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	-3.785*** (-7.10)	-3.038*** (-5.77)	-2.935*** (-5.53)	-3.493*** (-6.24)	-3.699*** (-7.04)
<i>Ed</i>	-0.384*** (-9.01)	-0.611*** (-18.16)	-0.645*** (-17.53)	-0.390*** (-9.00)	0.313*** (7.44)
<i>Tep</i>	-0.00859 (-0.57)	-0.00618 (-0.42)	-0.00706 (-0.47)	-0.00898 (-0.59)	-0.0130 (-0.87)
<i>Pop</i>	-1.989*** (-30.75)	-2.131*** (-33.18)	-2.152*** (-33.26)	-1.990*** (-30.65)	-2.059*** (-32.32)
<i>Er</i>	0.0711 (0.60)	-0.0371 (-0.33)	0.0205 (0.18)	0.111 (0.92)	0.152 (1.30)
<i>Fdi</i>	0.000319 (0.05)	-0.00661 (-1.18)	-0.00619 (-1.10)	0.000418 (0.07)	0.000316 (0.05)
<i>Mkt</i>	0.0391** (3.14)	0.0422*** (3.44)	0.0408*** (3.33)	0.0396** (3.16)	0.0444*** (3.61)
<i>W × Dig</i>	13.65* (2.25)	-1.585 (-1.42)	-1.111 (-1.01)	11.94 (1.93)	13.80* (2.30)
<i>W × Dig</i> <sup>2</sup>	-20.21** (-2.85)	0.474 (0.34)	-0.430 (-0.31)	-17.82* (-2.47)	-25.41*** (-3.62)
$\rho$	0.0483 (0.28)	0.167*** (4.84)	0.169*** (4.96)	0.0366 (0.21)	-0.233 (-1.19)
$\sigma^2$	0.0451*** (37.34)	0.0442*** (37.27)	0.0442*** (37.26)	0.0454*** (37.08)	0.0437*** (37.34)
Log-L	365.4120	384.9453	386.5253	351.0940	407.6882
N	2790	2790	2790	2750	2790
拐点	0.4236	0.5041	0.5242	0.4427	0.3790

<sup>①</sup> 本文采用 2011—2020 年的人均 GDP 的平均值构建经济距离矩阵与经济地理嵌套矩阵。

由表 5.6 回归结果可知,前三列报告了替换空间矩阵的回归结果,通过观察可知,数字经济发展对本地与周边城市碳减排均存在非线性影响过程,其中第二列与第三列空间外溢不显著,可能是由于经济距离矩阵与经济地理嵌套矩阵的内生性造成的。通过剔除北京市、上海市、天津市和重庆市这四个直辖市,能够发现数字经济助力城市碳减排的影响过程与上文相符。在替换核心变量碳排放强度之后,各变量符号方向与显著性与原来的基本一致,可以论证前文研究结论的可靠性。

#### 5.2.4 数字经济发展影响城市碳减排的空间交互效应分析

为进一步探究数字经济发展对城市碳排放的影响机制,本文根据第三章的理论分析,选取经济发展和技术进步变量,探讨数字经济发展影响城市碳排放的作用路径。空间交互效应的回归结果如 5.7 所示。

表 5.7 空间交互效应回归结果

变量	单一路径		(3) 双重路径
	(1) 经济发展	(2) 技术进步	
<i>Dig</i>	38.04*** (15.27)	2.682*** (4.98)	38.77*** (14.56)
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	-44.47*** (-8.68)	-2.275** (-2.91)	-45.46*** (-8.35)
<i>Ed</i>	-0.167*** (-3.64)	-0.389*** (-9.10)	-0.169*** (-3.66)
<i>Tep</i>	-0.0105 (-0.72)	-0.0612 (-1.82)	0.0259 (0.78)
<i>Pop</i>	-2.241*** (-34.66)	-2.005*** (-31.04)	-2.245*** (-34.72)
<i>Er</i>	0.148 (1.29)	0.0766 (0.65)	0.150 (1.30)
<i>Fdi</i>	0.00283 (0.49)	0.000345 (0.06)	0.00290 (0.51)
<i>Mkt</i>	0.0390** (3.25)	0.0381** (3.06)	0.0390** (3.24)
<i>Dig</i> × <i>Ed</i>	-3.082*** (-14.33)		-3.113*** (-14.01)
<i>Dig</i> <sup>2</sup> × <i>Ed</i>	3.630*** (9.02)		3.674*** (8.82)
<i>Dig</i> × <i>Tep</i>		0.661* (2.20)	-0.323 (-1.08)
<i>Dig</i> <sup>2</sup> × <i>Tep</i>		-1.649**	0.389

续表 5.7 空间交互效应回归结果

变量	单一路径		(3) 双重路径
	(1) 经济发展	(2) 技术进步	
		(-2.89)	(0.68)
$W \times Dig$	7.350 (0.30)	17.32** (2.72)	9.849 (0.38)
$W \times Dig^2$	-126.7**	-24.48**	-126.8**
	7.350	(-2.83)	(-2.73)
$W \times Dig \times Ed$	1.315 (0.65)		1.264 (0.60)
$W \times Dig^2 \times Ed$	8.340* (2.43)		7.937* (2.21)
$W \times Dig \times Tep$		-2.749 (-0.89)	-3.630 (-1.19)
$W \times Dig^2 \times Tep$		2.410 (0.40)	5.992 (1.00)
$\rho$	-0.186 (-0.95)	-0.0215 (-0.12)	-0.230 (-1.15)
$\sigma^2$	0.0417*** (37.35)	0.0448*** (37.35)	0.0416*** (37.30)
Log-L	473.4303	374.2633	476.3733
N	2790	2790	2790
拐点	0.4277	0.5894	0.4264

如表 5.7 所示：

在第 (1) 列中，经济发展与数字经济一次项的交互项系数为显著负，二次项系数为显著正，表明在数字经济能够通过经济发展影响碳排放，且其影响过程存在先抑制，后促进的作用。在一定程度上，经济发展使主效应的倒“U”型曲线变得平缓。通过观察经济发展与数字经济交互项的空间滞后项，我们不难发现，经济发展对于周边城市的碳排放同样具有先抑制，后促进的作用效果。总体来看，要使数字经济通过经济发展在长期助益低碳减排，仍需要其他政策手段，优化经济结构，改善能源环境。

在第 (2) 列中，技术进步与数字经济一次项的交互系数为显著正，二次项的系数为显著负，表明数字经济能够通过技术进步途径作用于碳排放，其影响过程呈现先促进，后抑制的态势，也即技术进步途径能够放大主效应的非线性趋势。与此同时，能够明显看出数字经济拐点值向右偏移到了 0.59。通过观察技术进步与数字经济交互项的空间滞后项，可以发现技术进步途径对于周边城市碳排放的影响不显著。从短期来看，技术进步能够增加本地的排碳量，而从长期来看，技术进步途径能够促进本地低碳减排，同时

对本地的减排作用要大于对周边城市的影响。

在第（3）列中，空间交互模型同时引入了经济发展和技术进步与数字经济的交互项，由回归结果可知，经济发展途径能够减缓主效应的倒“U”型趋势，而技术进步在回归中的结果不显著。总体来看，在双重路径下，经济发展路径是数字经济作用于城市碳减排的主要途径。因此，利用数字技术手段充分发挥经济发展的最大效能，弱化经济发展对于环境的刺激作用显得尤为重要。本节的路径探讨验证了第三章的研究假设 H2，同时为提出数字经济助力城市低碳减排的对策提供了重要参考。

### 5.2.5 数字经济发展影响城市碳减排的空间异质性分析

本文立足于区域发展不平衡的现状，试图从空间经济学所倡导的集聚经济视角，突破现代经济学“平滑经济”的约束，进一步解析数字经济发展影响城市碳排放的主要机制效应及其空间特征。故此，基于空间杜宾模型，选取东部、中部、西部和东北地区进行空间异质性分析。回归结果如表 5.8 所示。

表 5.8 空间异质性分析结果

变量	(1) 东部地区	(2) 中部地区	(3) 西部地区	(4) 东北地区
<i>Dig</i>	2.258*** (3.92)	3.319*** (3.32)	8.763*** (6.15)	6.156*** (4.60)
<i>Dig</i> <sup>2</sup>	-2.435*** (-3.93)	-5.731*** (-3.56)	-14.56*** (-4.57)	-11.39*** (-3.43)
<i>Ed</i>	-0.150* (-2.21)	-0.193** (-2.94)	-0.473*** (-5.24)	-0.927*** (-13.21)
<i>Tep</i>	-0.0228 (-0.99)	0.0132 (0.65)	-0.0388 (-1.09)	0.0361 (1.33)
<i>Pop</i>	-3.574*** (-22.12)	-1.802*** (-14.91)	-1.711*** (-17.37)	-5.919*** (-15.77)
<i>Er</i>	-0.134 (-0.90)	0.0709 (0.38)	0.768** (2.88)	0.450 (1.18)
<i>Fdi</i>	-0.0606*** (-3.63)	0.0295* (2.12)	0.00645 (0.66)	0.00660 (0.74)
<i>Mkt</i>	0.0153 (0.80)	0.00696 (0.41)	0.0406 (1.35)	0.0771** (3.09)
<i>W × Dig</i>	2.269*** (3.80)	3.333** (3.22)	8.812*** (6.00)	6.964*** (5.16)
<i>W × Dig</i> <sup>2</sup>	-2.469*** (-3.84)	-5.913*** (-3.65)	-14.68*** (-4.45)	-12.94*** (-4.15)
$\rho$	0.0500	-1.127***	0.0578	-1.429***

续表 5.8 空间异质性分析结果

变量	(1) 东部地区	(2) 中部地区	(3) 西部地区	(4) 东北地区
	(0.31)	(-4.10)	(0.30)	(-4.56)
$\sigma^2$	0.0500	-1.127***	0.0578	-1.429***
	(0.31)	(-4.10)	(0.30)	(-4.56)
Log-L	284.4452	384.0133	-64.0579	182.1142
N	860	800	810	320
拐点	0.4636	0.2896	0.3009	0.2702

如表 5.8 回归结果所示：第一，数字经济发展对城市碳排放的影响在区域内均呈现出倒“U”型的非线性特征，同时其空间外溢影响过程也具有显著的非线性趋势。第二，在不同区域，数字经济对城市碳排放的影响由弱到强依次为：东部地区、中部地区、东北地区、西部地区，也即数字经济在西部地区作用效果最强，在东部的作用效果最弱。可能的原因在于，东部地区较早引入了清洁型能源，进行了相关技术迭代，而西部与东北地区存在大量煤炭污染产业，节能减排的难度相对较大。故数字经济发展应发挥规模效应与结构效应，促进西部与东北地区的节能减排。第三，在不同区域，拐点数值由小到大依次为：东北地区、中部地区、西部地区、东部地区，也即东北地区的最容易跨越阈值，实现数字经济节能减排。结合 2020 年城市的数字经济指数，在中部地区的 80 个城市中，仅有 2 个城市越过了拐点值，西部地区的 81 个城市中有 2.47% 的城市越过了拐点，东部地区的 86 个城市中有 4.65% 的城市越过了拐点，而东北地区的 32 个城市中有 3.13% 的城市越过发展阈值，表明我国城市的数字经济低碳减排仍处于初步阶段。

## 6 结论、对策与展望

### 6.1 主要结论

随着城市数字化发展不断加深，数字经济正在引领社会新一轮变革，大数据、互联网、人工智能与传统产业相互融合，给低碳减排带来了新的发展契机。与此同时，城市发展的集聚效应和扩散效应深刻影响着碳减排的成效。基于此，本文将数字经济与城市碳排放纳入同一分析框架，基于空间经济视角，开展文献回顾与理论分析，通过将数字经济纳入C-D函数与扩展的IPAT等式，进行数理模型推导；然后采用我国2011—2020年城市层面数据，构建数字经济发展与碳排放指标，从而进行空间溢出效应、空间交互效应和空间异质性分析，试图从理论和实证两个层面厘清数字经济影响城市碳排放的空间特征与主要机制。同时，通过替换空间权重矩阵、剔除直辖市与替换核心变量的方法进行稳健性检验，以确保回归结果的可靠性。

本文的主要研究结论如下：

第一，数字经济发展与城市碳排放均存在显著的空间相关性。本文通过运用空间分位图、Moran's I与LISA集聚图，发现数字经济发展与城市碳排放强度分别呈现“东高西低”“北高南低”的空间分异性，在空间维度存在明显的集聚特征，体现了空间经济学的块状分布结构。通过考察不同城市的动态跃迁，发现绝大多数城市的数字经济发展水平在逐渐升高，碳排放强度在日益降低，表明两者存在一定的负向相关关系。

第二，数字经济发展对城市碳排放的影响存在先促进，后抑制的倒“U”型特征，即在越过阈值之前，数字经济发展具有促排作用，在跨过阈值之后，具有显著的抑制作用。此外，数字经济对周边城市的碳排放具有同样的影响。数字化发展不仅能够影响本城市的低碳减排，还能通过空间外溢作用于周边城市。通过替换空间矩阵与关键变量、剔除直辖市进行稳健性检验，该结论仍然成立。

第三，经济发展与技术进步是数字经济作用于城市碳排放的重要路径。在单一路径中，经济发展能够缩小数字经济对城市碳排放的非线性趋势，而技术进步对数字经济的影响效应具有“放大”作用。在双重路径中，经济发展是数字经济低碳减排的主要途径，而技术进步的作用相对较小，这意味着运用经济发展刺激城市长效减排显得尤为重要。

第四，数字经济对城市碳排放的影响存在显著的空间异质性。在作用效应方面，由低到高依次为：东部地区、中部地区、东北地区、西部地区。而在阈值方面，由低到高

依次为：东北地区、中部地区、西部地区、东部地区，通过比较城市的数字经济指标，能够发现大部分城市没能跨越阈值，表明我国仍需采取相应措施助力城市的数字经济发展。

## 6.2 对策建议

数字经济发展不仅能够加速城市要素流动，推动技术迭代升级，跨越阈值后，还能促进城市低碳减排，助益城市绿色发展。随着数字化程度的不断加深，数字经济的发展为双碳目标的实现提供了重要推动力。由此可见，数字经济发展对城市碳排放的影响应受到学者和政府的重视。因此，本文针对目前的现状问题与研究结论，提出如下对策建议：

第一，完善城市数字基础设施建设，营造良好的数字金融环境，为数字产业发展赋能。政府部门应加大数字基础投资，提高偏远地区互联网与宽带的覆盖率，完善大数据网络架构，打造方便高效的数字金融服务平台，充分发挥数字经济的包容性和便利性特征，为数字产业化与产业数字化发展提供条件。同时，数字产业发展能够依赖数字经济，实现产业结构升级，加速数据要素与传统产业深度融合，发挥数字经济的低污染、低能耗优势，助力绿色低碳发展。对高排放的制造业而言，数字经济能够降低其生产成本，加速相关产业绿色转型；对于服务业而言，数字经济能够转变其运营模式，减少行业的能源消耗；对于农业而言，数字经济能够作为新的要素嵌入，提升农业的绿色生产效率。

第二，加强区域数字经济发展联系，构建碳排放的协同减排机制，发挥碳减排的正向促进作用。城市的数字经济发展具有明显的空间联动特征，区域内部的发展能够通过空间外溢作用于周边城市。同时，数字经济在城市层面具有显著的集聚态势，能够形成“辐射效应”影响周边地区。因而，政府需加强区际发展联系，打造数字经济发展优势，出台碳排放相关政策，共同发挥数字经济对碳减排的正外部性。一方面，政府应积极推进内部数字化转型，搭建数字政府共享平台，强化城市间的政策沟通。另一方面，碳减排的相关政策制度应适应城市环境的当前需要，避免因政策时滞造成的不利影响。

第三，利用经济发展的作用路径，发挥经济集聚对环境的正向作用，助益城市低碳减排。数字经济影响城市碳减排的路径中，经济发展尤为重要。政府应充分利用经济集聚的发展优势，打造高质量发展、低能源消耗的数字集群，强化数字知识溢出与区域分工协作，打造横向与纵向的产业链，全面提升产业的生产效率，从生产源头出发，降低不必要的成本，形成区域良性循环减排态势，同时，对环境友好型企业提供税收奖励与

政策倾斜，加快城市的数字经济发展步入碳减排阶段。

第四，培育数字技术相关人才，发挥技术进步的减排优势，强化技术效应良性溢出。技术进步是数字经济助力碳减排的又一重要途径。政府可以通过优化人才引进政策，营造良好的发展环境，落实人才引进配套措施，引入数字技能型人才。同时，通过整合全市的要素资源，在全域搭建“产学研”智能平台，培育数字技术跨界专家，鼓励校企合作，加快成果产出，全面提升企业的全要素生产率，倒逼企业进行数字技术改革，减少企业的能源消费，充分发挥降碳减排的技术优势，实现城市经济与环境保护的协同发展。

### 6.3 不足与展望

受限于很多方面的影响，本文可能有以下不足：

第一，数字经济综合指数的测度问题。由于学界对数字经济定义与测度不统一，本文针对城市的数字经济发展进行测度具有一定的主观性，在构建数字经济指标体系时，对二级与三级指标的选取存在一定的不足。后续研究可以进一步探讨城市的数字经济内涵，完善城市数字经济相应理论，测算更具说服力的综合指标。

第二，数字经济指数的时间跨度问题。受限于城市维度数字经济发展分指数的可获得性（2011—2020），本文研究的时间跨度相对较短，难以全面反映数字经济影响碳排放的现实情况。故后续研究可以通过拓展时间跨度，更好地研究数字经济与碳排放的相互关系。

第三，空间计量模型的内生性问题。本文主要运用空间近邻矩阵、反距离空间权重矩阵、经济距离矩阵以及经济地理嵌套矩阵进行空间计量实证分析，尽管通过三大矩阵进行了稳健性检验，但仍可能存在测量误差、遗漏变量与反向因果的内生性问题。受限于空间工具变量法的发展，目前没有较好的方式解决本文空间杜宾模型的内生性问题。故后续研究能够通过新的模型工具，解决本文的内生性问题。

## 参考文献

- [1] Ang J B. CO<sub>2</sub> emissions, research and technology transfer in China[J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(10): 2658–2665.
- [2] Bukht R, Heeks R. Defining, Conceptualising and Measuring the Digital Economy[N]. *Development Informatics Working Paper*, 2017.
- [3] Chen H, Zhang X, Wu R, et al. Revisiting the environmental Kuznets curve for City-level CO<sub>2</sub> emissions: Based on corrected NPP-VIIRS nighttime light data in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 121575.
- [4] Commoner B. *The Closing Circle: Nature, Man, and Technology* [M]. New York: Bantam Books, Inc. , 1971.
- [5] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the Environmental Impacts of Population, Affluence and Technology[J]. *Human Ecology Review*, 2021, 1(2): 277–300.
- [6] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of Population Growth[J]. *Science*, 1971, 171: 1212–1217.
- [7] Fujita M, Mori T. The role of ports in the making of major cities: Self-agglomeration and hub-Effect[J]. *Journal of Development Economics*, 1996, 49(1): 93 – 120.
- [8] Grossman G M, Krueger A B. Economic Growth and the Environment[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2): 353–377.
- [9] Hamdi H, Sbia R, Shahbaz M. The nexus between electricity consumption and economic growth in Bahrain[J]. *Economic Modelling*, 2014, 38: 227–237.
- [10] IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[C]//*Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. 2007.
- [11] Kim B, Barua A, Whinston A B. Virtual field experiments for a digital economy: A new research methodology for exploring an information Economy[J]. *Decision Support Systems*, 2002, 32(3): 215 – 231.
- [12] Lane N. Advancing the Digital Economy into the 21st Century[J]. *Information Systems Frontiers*, 1999(1): 317 – 320.
- [13] Li Y, Yang X, Ran Q, et al. Energy structure, digital economy, and carbon emissions:

- Evidence from China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(45): 64606 – 64629.
- [14] 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.
- [15] Lin B, Du K. Modeling the dynamics of carbon emission performance in China: A parametric Malmquist index Approach[J]. *Energy Economics*, 2015, 49: 550–557.
- [16] List J A, Co C Y. The Effects of Environmental Regulations on Foreign Direct Investment[J]. *Journal of Environmental Economics and Management*, 2000, 40(1): 1–20.
- [17] Mizobuchi K. An empirical study on the rebound effect considering capital Costs[J]. *Energy Economics*, 2008, 30(5): 2486–2516.
- [18] Peters G P, Weber C L, Guan D, et al. China's Growing CO<sub>2</sub> Emissions A Race between Increasing Consumption and Efficiency Gains[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(17): 5939–5944.
- [19] Porter M E, Linde C van der. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship[J]. *Journal of Economic Perspectives*, 1995, 9(4): 97–118.
- [20] Shan Y, Guan D, Zheng H, et al. China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997–2015[J]. *Scientific Data*, 2018, 5(1): 170201.
- [21] 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.
- [22] Shi A. The impact of population pressure on global carbon dioxide emissions, 1975–1996: Evidence from pooled cross-country Data[J]. *Ecological Economics*, 2003: 29–42.
- [23] Stokey N L. Are There Limits to Growth? [J]. *International Economic Review*, 1998, 39(1): 1–31.
- [24] Tapscott D. *The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*[J]. New York: McGraw Hill, 1996: 69–71.
- [25] 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.
- [26]Wang H, Hu X, Ali N. Spatial Characteristics and Driving Factors Toward the Digital Economy: Evidence from Prefecture-Level Cities in China[J]. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 2022, 9(2): 419–426.
- [27]Wang Q, Zhou P, Zhou D. Efficiency measurement with carbon dioxide emissions: The case of China[J]. *Applied Energy*, 2012, 90(1): 161–166.
- [28]Zha Y, Zhao L, Bian Y. Measuring regional efficiency of energy and carbon dioxide emissions in China: A chance constrained DEA Approach[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 66: 351–361.
- [29]柏亮, 陈小辉. 数字经济如何影响工业 SO<sub>2</sub> 排放?——理论解读与实证检验[J]. *东北财经大学学报*, 2020(5): 73–81.
- [30]柏培文, 张云. 数字经济、人口红利下降与中低技能劳动者权益[J]. *经济研究*, 2021, 56(5): 91–108.
- [31]陈贵富, 韩静, 韩恺明. 城市数字经济发展、技能偏向型技术进步与劳动力不充分就业[J]. *中国工业经济*, 2022(8): 118–136.
- [32]陈诗一. 中国碳排放强度的波动下降模式及经济解释[J]. *世界经济*, 2011, 34(4): 124–143.
- [33]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(4): 122–128.
- [34]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.
- [35]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.
- [36]郭峰, 王靖一, 王芳, 等. 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.
- [37]韩峰, 谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗?——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J]. *数量经济技术经济研究*, 2017, 34(3): 40–58.
- [38]江小涓, 黄颖轩. 数字时代的市场秩序、市场监管与平台治理[J]. *经济研究*, 2021, 56(12): 20–41.

- [39]解春艳, 丰景春, 张可. 互联网技术进步对区域环境质量的影响及空间效应[J]. 科技进步与对策, 2017, 34(12): 35-42.
- [40]金灿阳, 徐蔼婷, 邱可阳. 中国省域数字经济发展水平测度及其空间关联研究[J]. 统计与信息论坛, 2022, 37(6): 11 - 21.
- [41]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(5): 706 - 716.
- [42]李广昊, 周小亮. 推动数字经济发展能否改善中国的环境污染——基于“宽带中国”战略的准自然实验[J]. 宏观经济研究, 2021(7): 146 - 160.
- [43]李菁, 李小平, 郝良峰. 技术创新约束下双重环境规制对碳排放强度的影响[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, 31(9): 34 - 44.
- [44]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(5): 87 - 97.
- [45]梁琦, 黄卓. 空间经济学在中国[J]. 经济学(季刊), 2012, 11(3): 1027 - 1036.
- [46]梁琦, 肖素萍, 李梦欣. 数字经济发展提升了城市生态效率吗?——基于产业结构升级视角[J]. 经济问题探索, 2021(6): 82 - 92.
- [47]林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. 管理世界, 2009(4): 27 - 36.
- [48]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(2): 112-125+128.
- [49]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(3): 72 - 85.
- [50]孟祺. 数字经济与高质量就业:理论与实证[J]. 社会科学, 2021(2): 47 - 58.
- [51]孟叶, 吴浩波. 新经济地理学理论前沿评述[J]. 河北经贸大学学报, 2023: 1 - 14.
- [52]邱子迅, 周亚虹. 数字经济发展与地区全要素生产率——基于国家级大数据综合试验区的分析[J]. 财经研究, 2021, 47(7): 4 - 17.
- [53]瞿小松, 邓翔, 余子楠. 全球碳排放交易及其效率——基于一个动态 CGE 模型的实证分析[J]. 财经科学, 2017(4): 99 - 107.
- [54]任晓松, 马茜, 刘宇佳, 等. 碳交易政策对工业碳生产率的影响及传导机制[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5427 - 5437.
- [55]盛鹏飞. 环境污染与城乡收入差距:作用机制与基于中国经济事实的检验[J]. 中国人

- 口·资源与环境, 2017, 27(10): 56 - 63.
- [56]王彬燕, 田俊峰, 程利莎, 等. 中国数字经济空间分异及影响因素[J]. 地理科学, 2018, 38(6): 859 - 868.
- [57]王锋, 冯根福, 吴丽华. 中国经济增长中碳强度下降的省区贡献分解[J]. 经济研究, 2013, 48(8): 143 - 155.
- [58]王珏, 骆力前, 郭琦. 地方政府干预是否损害信贷配置效率?[J]. 金融研究, 2015(4): 99 - 114.
- [59]王军, 朱杰, 罗茜. 中国数字经济发展水平及演变测度[J]. 数量经济技术经济研究, 2021, 38(7): 26 - 42.
- [60]王小鲁, 胡李鹏, 樊纲. 中国分省份市场化指数(2021) [M]. 北京: 社会科学文献出版社: 2021. 10, 223-237.
- [61]乌家培. 网络经济及其对经济理论的影响[J]. 学术研究, 2000(1): 4 - 10.
- [62]吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. 统计研究, 2016, 33(1): 54 - 60.
- [63]相天东. 我国区域碳排放效率与全要素生产率研究——基于三阶段 DEA 模型[J]. 经济经纬, 2017, 34(1): 20 - 25.
- [64]谢雄标, 吴越, 严良. 数字化背景下企业绿色发展路径及政策建议[J]. 生态经济, 2015, 31(11): 88 - 91.
- [65]谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. 当代经济管理, 2022, 44(2): 68 - 78.
- [66]徐昊, 马丽君. 数字经济、资源依赖与绿色经济发展[J]. 金融与经济, 2022(1): 45 - 54.
- [67]徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究, 2022, 41(1): 111 - 129.
- [68]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.
- [69]许和连, 邓玉萍. 外商直接投资导致了中国的环境污染吗?——基于中国省际面板数据的空间计量研究[J]. 管理世界, 2012(2): 30 - 43.
- [70]杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战——基于技术进步的视角[J]. 经济研究, 2019, 54(11): 118 - 132.

- [71]叶琴, 曾刚, 戴劭劼, 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.
- [72]易行健, 周利. 数字普惠金融发展是否显著影响了居民消费——来自中国家庭的微观证据[J]. 金融研究, 2018(11): 47 - 67.
- [73]余泳泽, 刘大勇, 龚宇. 过犹不及事缓则圆:地方经济增长目标约束与全要素生产率[J]. 管理世界, 2019, 35(7): 26-42+202.
- [74]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(6): 12-20+29.
- [75]张贺, 白钦先. 数字普惠金融缩小了城乡收入差距吗? ——基于中国省份数据的面板门槛回归分析[J]. 经济问题探索, 2018(10): 122-129.
- [76]张金灿, 仲伟周. 基于随机前沿的我国省域碳排放效率和全要素生产率研究[J]. 软科学, 2015, 29(6): 105-109.
- [77]张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J]. 经济研究, 2004(10): 35 - 44.
- [78]张彤进, 蔡宽宁. 数字普惠金融缩小城乡居民消费差距了吗? ——基于中国省级面板数据的经验检验[J]. 经济问题, 2021(9): 31-39.
- [79]张焱. 数字经济、溢出效应与全要素生产率提升[J]. 贵州社会科学, 2021(3): 139-145.
- [80]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(5): 23-30+124.
- [81]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.
- [82]中国数字经济发展报告(2022年)[R]. 中国信通研究院, 2022, 104.
- [83]朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 人口与消费对碳排放影响的分析模型与实证[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(2): 98-102.

## 致 谢

时光荏苒，岁月悠悠，三年的硕士生涯即将结束。回首往昔，有欢乐，有憧憬，有迟迟发不出论文的惆怅，也有看不清未来方向的迷茫，个中滋味，唯有自知。所幸，在人生最重要的阶段，我得到了老师、朋友和家人最无私的帮助，慢慢地成长起来，在学习和生活中收获良多。在此，我想向所有关心和帮助我的人表示感谢。

经师易遇，人师难求。我要感谢我的导师刘建国教授，他学识渊博，一丝不苟，在学习和生活中，给予我莫大的帮助。从论文选题，到论文撰写，再到论文投稿，老师将毕生所学倾囊相授，甚至一字一句修改我们的论文，他严谨的治学态度深深影响着我，也让我得悟科研之不易。在平时的生活中，老师对我们每个人更是关怀备至，在我面临职业选择时，还提出了很多宝贵的建议，启发我深入思考问题，积极面对困难。何其有幸，得遇良师。愿老师身体健康，万事顺遂。

愿岁并谢，与友长兮。我要感谢我的朋友、舍友和师门同学，在他们的陪伴下，我度过了一段非常美好的时光，一起熬夜写论文，一起深夜谈心，一起聚餐玩耍……三年来，从相遇到相知，彼此鼓励，彼此帮助，他们的微笑，他们的话语会永远珍藏在我的记忆里。如今我们即将毕业，各奔前程。愿我们都能拥有更美好的明天。

家人闲坐，灯火可亲。我要感谢我的父母，他们含辛茹苦地养育我，竭尽全力为我提供最好的条件，让我得以衣食无忧，幸福快乐地成长。他们是我的至亲，更是我的挚友，在我人生的每一个关键阶段，都耐心和我交流分析，永远在我的身后支持我，鼓励我，给了我全部的爱和尊重。寸草春晖，难以回报。愿我的父母平安健康，万事胜意。

少年没有乌托邦，心向远方自明朗。我要感谢努力的自己，感谢自己能够那么坚强，感谢自己一直充满希望，感谢自己在求学路上，不管遇到怎样的困难，都能够保持乐观，积极向上。在此，我借用一直喜欢的一首小诗，勉励现在和未来的自己：凡心所向，素履以往；生如逆旅，一苇以航。愿我一生都能清醒自由，纯真善良。

最后，衷心感谢参与本论文评阅的专家和教授，不足之处，请老师们批评指正。

书之有尽，致谢难穷。何其有幸，相逢在“一条河、一碗面和一本书”的美丽金城，相逢在这鸟语花香的兰州财经大学。希望不负遇见，不负自己！

兰州，再见！兰州财经大学，再见！

姚宇辰

二零二三年五月

## 附录一：在读期间科研成果

### （一）发表的学术论文

刘建国,姚宇辰,洪玲. 人口流动性对新冠肺炎疫情传播水平的影响:基于空间交互模型与SEIR模型[J].社科纵横,2022,37(04):66-71.

### （二）参与的科研项目

1. 国家社会科学基金一般项目“动态演化视域下人口年龄结构变化影响地方财政可持续性的机制与对策研究”，负责数据搜集和整理。

2. 兰州市科技计划项目“基于社会网络的艾滋病传播路径与预防机制研究”（2017-4-79），负责数据搜集和整理。

3. 兰州财经大学丝绸之路经济研究院 2017 年度重点科研项目“资源禀赋视域下人口老龄化对地方财政可持续性的影响研究”，负责数据搜集和整理。

4. 甘肃省优秀研究生“创新之星”项目“人口年龄结构与经济集聚对碳排放影响的机制与对策研究”，负责数据搜集和整理。

## 附录二

2011-2020年各城市的数字经济指数总得分

城市	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
北京市	0.2214	0.2598	0.2974	0.3116	0.3522	0.3908	0.3964	0.4921	0.5175	0.5228
天津市	0.0752	0.1067	0.1461	0.1746	0.2346	0.2113	0.2347	0.2472	0.2592	0.2868
石家庄市	0.0646	0.0944	0.1398	0.1387	0.1645	0.1847	0.2298	0.2674	0.2941	0.2973
唐山市	0.0577	0.0835	0.1079	0.1099	0.1256	0.1455	0.1626	0.1753	0.1875	0.1920
秦皇岛市	0.0680	0.0893	0.1254	0.1325	0.1488	0.2010	0.1921	0.2019	0.2134	0.2276
邯郸市	0.0454	0.0614	0.0804	0.0866	0.1041	0.1244	0.1458	0.1477	0.1622	0.1664
邢台市	0.0418	0.0619	0.0837	0.0808	0.1047	0.1297	0.1489	0.1606	0.1741	0.1813
保定市	0.0457	0.0708	0.0953	0.0959	0.1251	0.1418	0.1683	0.1758	0.2009	0.1843
张家口市	0.0555	0.0808	0.0977	0.1050	0.1239	0.1439	0.1680	0.1694	0.1904	0.1811
承德市	0.0547	0.0770	0.1107	0.1060	0.1235	0.1457	0.1719	0.1834	0.1932	0.1856
沧州市	0.0464	0.0666	0.0908	0.0935	0.1125	0.1248	0.1510	0.1688	0.1846	0.1735
廊坊市	0.0673	0.0922	0.1589	0.1584	0.1777	0.1902	0.2598	0.2294	0.2493	0.2407
衡水市	0.0495	0.0701	0.0975	0.0957	0.1225	0.1430	0.1665	0.1796	0.1904	0.1845
太原市	0.1029	0.1292	0.1778	0.1659	0.1821	0.1977	0.2100	0.2507	0.2698	0.2498
大同市	0.0554	0.0858	0.1061	0.1065	0.1227	0.1275	0.1461	0.1649	0.1797	0.1702
阳泉市	0.0534	0.0800	0.1073	0.1156	0.1321	0.1546	0.1629	0.1889	0.2308	0.1990
长治市	0.0454	0.0642	0.0893	0.0957	0.1150	0.1307	0.1535	0.1538	0.1616	0.1620
晋城市	0.0515	0.0729	0.0968	0.1013	0.1232	0.1514	0.1618	0.1842	0.2212	0.1949
朔州市	0.0428	0.0704	0.0924	0.0996	0.1130	0.1397	0.1515	0.1566	0.1587	0.1607
晋中市	0.0533	0.0761	0.1039	0.1017	0.1246	0.1783	0.1509	0.1591	0.1967	0.1828
运城市	0.0438	0.0637	0.1122	0.1046	0.1283	0.1553	0.1771	0.1473	0.1803	0.1756
忻州市	0.0577	0.0800	0.0946	0.1038	0.1224	0.1445	0.1516	0.1560	0.1664	0.1672
临汾市	0.0514	0.0709	0.1013	0.1078	0.1277	0.1535	0.1628	0.1676	0.1691	0.1732
吕梁市	0.0434	0.0601	0.1074	0.0970	0.1166	0.1324	0.1527	0.1830	0.2241	0.1896
呼和浩特市	0.1002	0.1291	0.1950	0.1657	0.1956	0.2283	0.2356	0.2974	0.3372	0.2852
包头市	0.0743	0.0907	0.1295	0.1124	0.1329	0.1538	0.1670	0.1696	0.1798	0.1802
乌海市	0.0736	0.1078	0.1441	0.1447	0.1601	0.1677	0.1989	0.2101	0.2145	0.2101
赤峰市	0.0505	0.0629	0.0975	0.1075	0.1241	0.1378	0.1635	0.1651	0.1669	0.1655
通辽市	0.0623	0.0850	0.1135	0.1146	0.1273	0.1338	0.1589	0.1587	0.1646	0.1653
鄂尔多斯市	0.0711	0.0897	0.1240	0.1255	0.1264	0.1424	0.1700	0.1749	0.1828	0.1804
呼伦贝尔市	0.0492	0.0716	0.1005	0.1164	0.1346	0.1419	0.1591	0.1598	0.1715	0.1701
巴彦淖尔市	0.0874	0.0756	0.0963	0.1159	0.1279	0.1585	0.1791	0.1683	0.1694	0.1730
乌兰察布市	0.0492	0.0807	0.1051	0.1108	0.1366	0.1471	0.1603	0.1611	0.1593	0.1679
沈阳市	0.0886	0.1200	0.1515	0.1510	0.1760	0.1977	0.2175	0.2352	0.2494	0.2358
大连市	0.1184	0.1473	0.2029	0.2101	0.2373	0.2652	0.3043	0.3153	0.3379	0.3106
鞍山市	0.0580	0.0823	0.1075	0.1100	0.1278	0.1431	0.1610	0.1815	0.1867	0.1795
抚顺市	0.0558	0.0792	0.1025	0.1109	0.1349	0.1542	0.1666	0.1738	0.1776	0.1767
本溪市	0.0551	0.0788	0.1148	0.1272	0.1398	0.1648	0.1671	0.1722	0.1804	0.1787
丹东市	0.0894	0.0955	0.1090	0.1169	0.1413	0.1604	0.1780	0.1880	0.1983	0.1922
锦州市	0.0534	0.0811	0.1059	0.1283	0.1450	0.1617	0.1811	0.1674	0.2257	0.1959
营口市	0.0536	0.0858	0.1160	0.1243	0.1431	0.1568	0.1760	0.1825	0.1932	0.1857

阜新市	0.0577	0.0869	0.1047	0.1271	0.1522	0.1553	0.1837	0.1800	0.1767	0.1814
辽阳市	0.0570	0.0808	0.1096	0.1198	0.1362	0.1595	0.1675	0.1729	0.1832	0.1785
盘锦市	0.0592	0.0831	0.1089	0.1136	0.1352	0.1558	0.1738	0.1852	0.1934	0.1872
铁岭市	0.0437	0.0666	0.0856	0.1020	0.1203	0.1390	0.1570	0.1618	0.1654	0.1635
朝阳市	0.0393	0.0656	0.0811	0.0933	0.1184	0.1350	0.1585	0.1590	0.1632	0.1595
葫芦岛市	0.0456	0.0800	0.1047	0.1112	0.1288	0.1443	0.1710	0.1658	0.1796	0.1737
长春市	0.0798	0.1070	0.1437	0.1548	0.1751	0.1972	0.2180	0.2299	0.2396	0.2309
四平市	0.0497	0.0757	0.1178	0.1260	0.1397	0.1555	0.1676	0.1662	0.1740	0.1727
辽源市	0.0589	0.0794	0.0903	0.1053	0.1244	0.1356	0.1504	0.1662	0.1785	0.1708
通化市	0.0607	0.0941	0.1021	0.1173	0.1328	0.1469	0.1737	0.1805	0.1868	0.1822
白山市	0.1689	0.0865	0.1037	0.1113	0.1327	0.1487	0.1681	0.1773	0.1905	0.1852
松原市	0.0392	0.0626	0.0724	0.0987	0.1117	0.1254	0.1413	0.1428	0.1501	0.1492
白城市	0.0440	0.0676	0.0852	0.0973	0.1196	0.1325	0.1590	0.1501	0.1610	0.1583
哈尔滨市	0.1226	0.1074	0.2276	0.1521	0.1734	0.1920	0.2147	0.2279	0.2823	0.2471
齐齐哈尔市	0.0412	0.0615	0.0943	0.0964	0.1169	0.1447	0.1564	0.1522	0.1595	0.1591
鸡西市	0.0528	0.0771	0.0958	0.1128	0.1368	0.1469	0.1578	0.2189	0.2314	0.2003
鹤岗市	0.0442	0.0703	0.1389	0.0916	0.1151	0.1331	0.1515	0.1638	0.1690	0.1665
双鸭山市	0.0547	0.0832	0.1030	0.1170	0.1288	0.1473	0.1599	0.1536	0.1635	0.1652
大庆市	0.0750	0.0986	0.1297	0.1347	0.1536	0.1685	0.1736	0.1877	0.1953	0.1915
伊春市	0.0672	0.1070	0.1678	0.1178	0.1252	0.1373	0.1571	0.1708	0.1788	0.1757
佳木斯市	0.0525	0.0739	0.1002	0.1235	0.1362	0.1524	0.2010	0.1655	0.1680	0.1766
七台河市	0.0486	0.0772	0.0834	0.1038	0.1094	0.1349	0.1592	0.1576	0.1621	0.1600
牡丹江市	0.0639	0.0886	0.1105	0.1113	0.1302	0.1414	0.1779	0.1958	0.2187	0.1968
黑河市	0.0234	0.0560	0.0817	0.1018	0.1173	0.1836	0.1610	0.1551	0.1660	0.1659
上海市	0.1134	0.1459	0.3271	0.2217	0.2404	0.2592	0.2951	0.3247	0.6626	0.4392
南京市	0.1165	0.1463	0.2949	0.2813	0.3243	0.3581	0.3990	0.4442	0.4683	0.4178
无锡市	0.0912	0.1122	0.1952	0.1841	0.2170	0.2609	0.2932	0.3148	0.3544	0.3127
徐州市	0.0540	0.0809	0.0979	0.1100	0.1280	0.1591	0.1808	0.2009	0.2193	0.2041
常州市	0.0838	0.1109	0.1724	0.1582	0.1868	0.2264	0.2541	0.2849	0.3090	0.2789
苏州市	0.1047	0.1447	0.2479	0.2018	0.2351	0.2781	0.3209	0.3430	0.4041	0.3479
南通市	0.0725	0.0955	0.1202	0.1279	0.1478	0.1807	0.2123	0.2307	0.2589	0.2353
连云港市	0.0589	0.0889	0.1782	0.1179	0.1384	0.1677	0.1906	0.1985	0.2184	0.2114
淮安市	0.0508	0.0731	0.0934	0.1059	0.1266	0.1579	0.1876	0.2059	0.2240	0.2064
盐城市	0.0565	0.0795	0.0979	0.1037	0.1252	0.1562	0.1837	0.1975	0.2229	0.2033
扬州市	0.0800	0.1030	0.1265	0.1348	0.1594	0.1932	0.2184	0.2320	0.2498	0.2345
镇江市	0.0647	0.0904	0.1365	0.1354	0.1564	0.1864	0.2176	0.2301	0.2564	0.2356
泰州市	0.0660	0.0974	0.1046	0.1211	0.1378	0.1711	0.1957	0.2074	0.2317	0.2150
宿迁市	0.0493	0.0744	0.0950	0.1216	0.1556	0.1537	0.1798	0.1926	0.2198	0.2050
杭州市	0.1350	0.1789	0.2417	0.2905	0.3454	0.4142	0.4981	0.5582	0.5877	0.5022
宁波市	0.0933	0.1219	0.1706	0.1602	0.1788	0.2387	0.2804	0.2955	0.3127	0.2859
温州市	0.0850	0.1081	0.1424	0.1556	0.1842	0.2079	0.2353	0.2555	0.2711	0.2518
嘉兴市	0.0866	0.1168	0.1642	0.1482	0.1654	0.1805	0.2015	0.2115	0.2224	0.2231
湖州市	0.0734	0.1041	0.1585	0.1561	0.1633	0.1790	0.2121	0.2370	0.2992	0.2540
绍兴市	0.0766	0.1073	0.1307	0.1359	0.1542	0.1683	0.1891	0.2000	0.2096	0.2094
金华市	0.0898	0.1181	0.1619	0.1615	0.1797	0.1930	0.2260	0.2529	0.2664	0.2543

衢州市	0.0745	0.0891	0.1385	0.1257	0.1566	0.1636	0.2072	0.2219	0.2457	0.2273
舟山市	0.1048	0.1328	0.1596	0.2615	0.2787	0.2090	0.2099	0.2211	0.2298	0.2455
台州市	0.0770	0.1061	0.1310	0.1335	0.1523	0.1672	0.1858	0.2009	0.2133	0.2089
丽水市	0.0857	0.1087	0.1294	0.1516	0.1752	0.1931	0.2190	0.2356	0.2519	0.2382
合肥市	0.1039	0.0910	0.1251	0.1514	0.1737	0.2184	0.2534	0.2748	0.3031	0.2705
芜湖市	0.0458	0.0746	0.1017	0.1152	0.1455	0.1710	0.1970	0.2126	0.2288	0.2184
蚌埠市	0.0600	0.0666	0.1006	0.1009	0.1219	0.1392	0.1558	0.1777	0.1867	0.1790
淮南市	0.0367	0.0683	0.0873	0.0974	0.1077	0.1340	0.1530	0.1633	0.1716	0.1669
马鞍山市	0.0478	0.0826	0.1137	0.1223	0.1315	0.1569	0.1793	0.1973	0.2095	0.1989
淮北市	0.0365	0.0612	0.0868	0.1040	0.1182	0.1594	0.1589	0.1687	0.1817	0.1741
铜陵市	0.0561	0.0919	0.1144	0.1278	0.1178	0.1388	0.1836	0.1675	0.1842	0.1827
安庆市	0.0494	0.0758	0.0929	0.1144	0.1333	0.1467	0.1659	0.1833	0.1878	0.1855
黄山市	0.0787	0.1063	0.1357	0.1257	0.1414	0.1544	0.1782	0.1911	0.2002	0.1993
滁州市	0.0523	0.0905	0.1062	0.1267	0.1330	0.1481	0.1623	0.1981	0.1836	0.1898
阜阳市	0.0343	0.0610	0.0862	0.0832	0.1022	0.1256	0.1440	0.1592	0.1696	0.1650
宿州市	0.0364	0.0608	0.0797	0.1075	0.1293	0.1402	0.1332	0.1683	0.1731	0.1689
六安市	0.0210	0.0467	0.0665	0.1029	0.1131	0.1291	0.1537	0.1703	0.1780	0.1785
亳州市	0.0365	0.0596	0.0809	0.0866	0.1081	0.1283	0.1470	0.1629	0.1696	0.1678
池州市	0.0621	0.0848	0.1010	0.1352	0.1288	0.1480	0.1673	0.1870	0.1975	0.1901
宣城市	0.0521	0.0736	0.1011	0.1251	0.1423	0.1627	0.1717	0.1893	0.2003	0.1942
福州市	0.0868	0.1158	0.1534	0.1679	0.1987	0.2169	0.2603	0.2912	0.2963	0.2746
厦门市	0.1261	0.1709	0.2910	0.2285	0.2747	0.3272	0.3536	0.4451	0.5467	0.4340
莆田市	0.0616	0.1288	0.1329	0.1575	0.2018	0.2190	0.2662	0.2292	0.3031	0.2661
三明市	0.0687	0.0971	0.1216	0.1296	0.1510	0.1773	0.1944	0.2059	0.2111	0.2072
泉州市	0.0690	0.0933	0.1582	0.1400	0.1696	0.1954	0.2255	0.2523	0.2783	0.2516
漳州市	0.0572	0.0810	0.1308	0.1135	0.1326	0.1524	0.1777	0.1983	0.2079	0.1992
南平市	0.0737	0.0983	0.1383	0.1457	0.1718	0.1792	0.1836	0.1916	0.1998	0.2020
龙岩市	0.0637	0.0894	0.1123	0.1293	0.1567	0.1868	0.2098	0.2055	0.2183	0.2121
宁德市	0.0908	0.0966	0.1631	0.1338	0.1543	0.1748	0.2042	0.2128	0.2244	0.2200
南昌市	0.0634	0.1026	0.1525	0.1763	0.1890	0.2184	0.2910	0.2659	0.2860	0.2696
景德镇市	0.0666	0.1409	0.1076	0.1135	0.1297	0.1422	0.1520	0.1582	0.2107	0.1903
萍乡市	0.0547	0.0761	0.0946	0.0975	0.1169	0.1386	0.1573	0.1758	0.1787	0.1735
九江市	0.0451	0.0612	0.0942	0.1041	0.1229	0.1379	0.1561	0.1663	0.1726	0.1722
新余市	0.0483	0.0801	0.1033	0.1199	0.1368	0.1668	0.1813	0.2202	0.2733	0.2258
鹰潭市	0.0352	0.0652	0.0982	0.1175	0.1278	0.1608	0.1659	0.1759	0.1856	0.1817
赣州市	0.0459	0.0815	0.0926	0.1019	0.1240	0.1376	0.1590	0.1745	0.1818	0.1788
吉安市	0.0454	0.0743	0.0896	0.0956	0.1112	0.1335	0.1522	0.1497	0.1664	0.1655
宜春市	0.0309	0.0614	0.0897	0.0882	0.1083	0.1232	0.1438	0.1596	0.1642	0.1626
抚州市	0.0408	0.0636	0.0820	0.0890	0.1041	0.1221	0.1458	0.1539	0.1612	0.1619
上饶市	0.0432	0.0684	0.0854	0.0961	0.1174	0.1272	0.1470	0.1615	0.1709	0.1675
济南市	0.0873	0.1179	0.2257	0.2221	0.2741	0.2926	0.3259	0.3511	0.3185	0.3215
青岛市	0.0681	0.0973	0.1408	0.2204	0.1762	0.1856	0.2286	0.2470	0.2656	0.2489
淄博市	0.0509	0.0837	0.1089	0.1161	0.1373	0.1673	0.1921	0.1882	0.2268	0.2046
枣庄市	0.0520	0.0755	0.0984	0.1006	0.1190	0.1320	0.1542	0.1681	0.1856	0.1793
东营市	0.0779	0.1097	0.1309	0.1376	0.1464	0.1639	0.1828	0.2007	0.2145	0.2058

烟台市	0.0565	0.0828	0.1133	0.1184	0.1442	0.1628	0.1748	0.1834	0.1977	0.1939
潍坊市	0.0488	0.1036	0.1460	0.1519	0.2185	0.1565	0.1717	0.1770	0.2063	0.2048
济宁市	0.0307	0.0563	0.0821	0.0919	0.1068	0.1273	0.1518	0.1641	0.1766	0.1716
泰安市	0.0394	0.0603	0.0914	0.0996	0.1439	0.1400	0.1583	0.1727	0.1796	0.1782
威海市	0.0584	0.0932	0.1231	0.1252	0.1487	0.1700	0.1930	0.2058	0.2268	0.2140
日照市	0.0551	0.0687	0.0919	0.1047	0.1268	0.1494	0.1693	0.1726	0.1865	0.1823
临沂市	0.0592	0.0879	0.0977	0.0975	0.1174	0.1389	0.1663	0.1815	0.1908	0.1855
德州市	0.0441	0.0672	0.0870	0.0890	0.1077	0.1343	0.1544	0.1629	0.1813	0.1716
聊城市	0.0370	0.0596	0.0849	0.0850	0.1054	0.1331	0.1427	0.1529	0.1612	0.1607
滨州市	0.0417	0.0646	0.0945	0.0974	0.1133	0.1481	0.1696	0.1795	0.1886	0.1818
菏泽市	0.0278	0.0545	0.0796	0.0837	0.1032	0.1235	0.1423	0.1532	0.1679	0.1617
郑州市	0.0744	0.1209	0.1533	0.1797	0.2271	0.2533	0.2872	0.4169	0.5255	0.3882
开封市	0.0378	0.0555	0.0865	0.0963	0.1224	0.1293	0.1513	0.1558	0.1665	0.1675
洛阳市	0.0498	0.0718	0.1020	0.1117	0.1277	0.1498	0.1929	0.2145	0.2277	0.2080
平顶山市	0.0303	0.0551	0.0765	0.0881	0.1011	0.1220	0.1381	0.1414	0.1580	0.1545
安阳市	0.0454	0.0634	0.0878	0.0974	0.1203	0.1369	0.1600	0.1708	0.1791	0.1748
鹤壁市	0.0381	0.0575	0.0824	0.0954	0.1075	0.1279	0.1458	0.1595	0.1766	0.1690
新乡市	0.0412	0.0658	0.0900	0.1002	0.1265	0.1539	0.1699	0.1902	0.1966	0.1880
焦作市	0.0462	0.0672	0.0925	0.0999	0.1185	0.1515	0.1602	0.1756	0.1944	0.1835
濮阳市	0.0283	0.0581	0.0859	0.0976	0.1222	0.1673	0.1551	0.1613	0.1715	0.1714
许昌市	0.0332	0.0556	0.0823	0.0889	0.1108	0.1412	0.1631	0.1679	0.2154	0.1857
漯河市	0.0337	0.0535	0.0841	0.0844	0.0907	0.1044	0.1356	0.1442	0.1630	0.1551
三门峡市	0.0430	0.0653	0.1231	0.1496	0.1663	0.1886	0.1732	0.1816	0.2572	0.2170
南阳市	0.0321	0.0569	0.0761	0.0841	0.0992	0.1205	0.1429	0.1872	0.2220	0.1871
商丘市	0.0364	0.0581	0.0773	0.0848	0.1092	0.1365	0.1549	0.1614	0.1717	0.1678
信阳市	0.0404	0.0602	0.0902	0.1022	0.1158	0.1484	0.1612	0.1692	0.1898	0.1796
周口市	0.0301	0.0630	0.0764	0.0839	0.1045	0.1226	0.1430	0.1479	0.1664	0.1608
驻马店市	0.0296	0.0477	0.0687	0.0827	0.0994	0.1267	0.1477	0.1612	0.1634	0.1628
武汉市	0.0904	0.1265	0.1766	0.1853	0.2172	0.2439	0.2878	0.3420	0.3609	0.3162
黄石市	0.0459	0.0681	0.0976	0.1082	0.1261	0.1473	0.1681	0.1905	0.2138	0.1942
十堰市	0.0608	0.0958	0.1070	0.1107	0.1277	0.1470	0.1631	0.1785	0.1947	0.1862
宜昌市	0.0537	0.0742	0.1029	0.1130	0.1293	0.1556	0.1638	0.1760	0.1859	0.1814
襄阳市	0.0409	0.0640	0.0896	0.0945	0.1186	0.1374	0.1620	0.1741	0.1855	0.1764
鄂州市	0.0397	0.0722	0.1093	0.1190	0.1358	0.1695	0.1785	0.1983	0.2123	0.1994
荆门市	0.0485	0.0776	0.1006	0.1100	0.1308	0.1514	0.1697	0.1875	0.1945	0.1873
孝感市	0.0661	0.0627	0.0846	0.1088	0.1090	0.1296	0.1494	0.1623	0.1751	0.1700
荆州市	0.0451	0.0823	0.0969	0.1069	0.1302	0.1516	0.1674	0.1713	0.1859	0.1809
黄冈市	0.0342	0.0612	0.0879	0.0931	0.1117	0.1309	0.1456	0.1579	0.1726	0.1665
咸宁市	0.0426	0.0649	0.0929	0.1126	0.1342	0.1616	0.1702	0.2115	0.2169	0.2000
随州市	0.0338	0.0610	0.0941	0.1045	0.1143	0.1365	0.1545	0.1668	0.1789	0.1715
长沙市	0.0908	0.1204	0.1604	0.1627	0.1879	0.2183	0.2432	0.2638	0.2947	0.2686
株洲市	0.0516	0.0801	0.1045	0.1114	0.1267	0.1386	0.1671	0.1838	0.1969	0.1881
湘潭市	0.0574	0.0738	0.0935	0.1345	0.1279	0.1526	0.1605	0.1713	0.1824	0.1806
衡阳市	0.0429	0.0586	0.0842	0.0930	0.1134	0.1240	0.1475	0.1657	0.1709	0.1666
邵阳市	0.0459	0.0661	0.0842	0.0904	0.1061	0.1275	0.1393	0.1445	0.1543	0.1554

岳阳市	0.0456	0.0727	0.0908	0.0994	0.1285	0.1398	0.1602	0.1664	0.1767	0.1739
常德市	0.0503	0.0746	0.0906	0.1007	0.1189	0.1351	0.1552	0.1643	0.1734	0.1727
张家界市	0.0739	0.1012	0.1153	0.1226	0.1433	0.1574	0.1804	0.1899	0.1943	0.1923
益阳市	0.0421	0.0674	0.0869	0.0943	0.1130	0.1244	0.1486	0.1625	0.1707	0.1657
郴州市	0.0454	0.0718	0.0941	0.1072	0.1285	0.1381	0.1584	0.1726	0.1820	0.1782
永州市	0.0396	0.0682	0.0859	0.0919	0.1070	0.1277	0.1459	0.1547	0.1575	0.1597
怀化市	0.0427	0.0721	0.0913	0.1028	0.1205	0.1446	0.1534	0.1629	0.1724	0.1719
娄底市	0.0345	0.0653	0.0883	0.0937	0.1072	0.1231	0.1469	0.1559	0.1703	0.1631
广州市	0.1512	0.1715	0.3727	0.3013	0.3209	0.3834	0.4633	0.5343	0.5923	0.4963
韶关市	0.0556	0.0815	0.0996	0.1519	0.1629	0.1873	0.2083	0.2203	0.1806	0.2005
深圳市	0.1570	0.2461	0.8800	0.4054	0.3882	0.4457	0.4830	0.5426	0.6142	0.5543
珠海市	0.1317	0.1573	0.2450	0.2522	0.3135	0.3657	0.4486	0.4453	0.5280	0.4389
汕头市	0.0796	0.0943	0.1240	0.1143	0.1349	0.1676	0.2022	0.2187	0.2507	0.2226
佛山市	0.1102	0.1433	0.2261	0.1698	0.1912	0.2062	0.2420	0.2673	0.2948	0.2731
江门市	0.0649	0.0953	0.1288	0.1513	0.1690	0.2126	0.1837	0.1943	0.1995	0.2065
湛江市	0.0665	0.0847	0.1013	0.1137	0.1349	0.1675	0.1660	0.1679	0.1784	0.1815
茂名市	0.0441	0.0658	0.0813	0.0950	0.1247	0.1287	0.1503	0.1617	0.1800	0.1701
肇庆市	0.0790	0.1405	0.1430	0.1646	0.2516	0.1464	0.2338	0.2638	0.2826	0.2569
惠州市	0.0665	0.0958	0.1416	0.1290	0.1499	0.1645	0.1874	0.2381	0.2603	0.2314
梅州市	0.0551	0.0769	0.1013	0.1122	0.1298	0.1483	0.1693	0.2091	0.2328	0.2045
汕尾市	0.0576	0.0808	0.0933	0.1085	0.1312	0.1422	0.1729	0.1843	0.1937	0.1867
河源市	0.0481	0.0663	0.0858	0.0983	0.1219	0.1398	0.1591	0.1634	0.1853	0.1761
阳江市	0.0670	0.0893	0.0991	0.1070	0.1331	0.1526	0.1757	0.1987	0.2078	0.1966
清远市	0.0517	0.0787	0.0988	0.1101	0.1229	0.1404	0.1627	0.1750	0.1778	0.1779
东莞市	0.1011	0.1218	0.3708	0.1391	0.2198	0.2625	0.3091	0.3252	0.3684	0.3283
中山市	0.1091	0.1291	0.2817	0.2048	0.2535	0.2819	0.2875	0.3062	0.3295	0.3121
潮州市	0.0872	0.1122	0.1252	0.2349	0.1380	0.1670	0.1835	0.2113	0.2313	0.2224
揭阳市	0.0596	0.0852	0.1226	0.1515	0.1907	0.2255	0.2774	0.3857	0.5183	0.3674
云浮市	0.0641	0.0915	0.1425	0.1869	0.1551	0.1869	0.1734	0.2033	0.2310	0.2160
南宁市	0.1141	0.1478	0.1361	0.1383	0.1620	0.1780	0.1979	0.2255	0.2577	0.2348
柳州市	0.0700	0.1156	0.0977	0.1028	0.1273	0.1462	0.1633	0.1762	0.1890	0.1838
桂林市	0.0565	0.0772	0.0970	0.1028	0.1259	0.1432	0.1633	0.1761	0.2718	0.2086
梧州市	0.0481	0.0674	0.0926	0.0922	0.1155	0.1264	0.1411	0.1536	0.1628	0.1601
北海市	0.0644	0.0848	0.1079	0.1149	0.1421	0.1615	0.2357	0.1988	0.2123	0.2052
防城港市	0.0577	0.0784	0.1109	0.1271	0.1315	0.1497	0.1706	0.1688	0.1948	0.1849
贵港市	0.0275	0.0516	0.1472	0.0908	0.1044	0.1215	0.1479	0.1518	0.1612	0.1590
玉林市	0.0484	0.0674	0.0778	0.0821	0.1044	0.1231	0.1450	0.1986	0.1661	0.1665
百色市	0.0556	0.0680	0.0730	0.0815	0.1020	0.1220	0.1454	0.1472	0.1668	0.1559
贺州市	0.0458	0.0695	0.0863	0.1056	0.1124	0.1323	0.1530	0.1673	0.1713	0.1674
河池市	0.0338	0.0617	0.0825	0.0988	0.1159	0.1295	0.1467	0.1485	0.1590	0.1559
来宾市	0.0339	0.0641	0.0978	0.0882	0.1094	0.1254	0.1448	0.1583	0.1664	0.1602
崇左市	0.0371	0.0626	0.0809	0.0894	0.1099	0.1287	0.1460	0.1660	0.1689	0.1629
海口市	0.1119	0.1345	0.1840	0.1811	0.1986	0.2229	0.2640	0.2782	0.2835	0.2699
三亚市	0.0865	0.0923	0.1245	0.1430	0.1491	0.2114	0.2178	0.2315	0.2665	0.2397
重庆市	0.0956	0.0893	0.1166	0.1296	0.1546	0.1672	0.1874	0.2098	0.2222	0.2112

成都市	0.0746	0.0994	0.1694	0.1919	0.2410	0.2903	0.3134	0.3322	0.3290	0.3097
自贡市	0.0492	0.1366	0.0962	0.1097	0.1307	0.1431	0.1673	0.1699	0.1731	0.1764
攀枝花市	0.0496	0.1078	0.0912	0.1214	0.1347	0.1481	0.1843	0.2104	0.2030	0.1955
泸州市	0.0432	0.0626	0.0820	0.0983	0.1142	0.1378	0.1572	0.1673	0.1736	0.1688
德阳市	0.0515	0.1420	0.1229	0.1253	0.1369	0.1459	0.1930	0.1829	0.1932	0.1908
绵阳市	0.0573	0.0781	0.1032	0.1174	0.1398	0.1580	0.1855	0.1931	0.1855	0.1872
广元市	0.0806	0.0967	0.1039	0.1207	0.1395	0.1574	0.1666	0.1799	0.1721	0.1789
遂宁市	0.0348	0.1085	0.0765	0.0875	0.1123	0.1432	0.1486	0.1674	0.1671	0.1648
内江市	0.0350	0.0815	0.1110	0.0834	0.1052	0.1227	0.1990	0.2078	0.2373	0.2023
乐山市	0.0529	0.0710	0.0931	0.0998	0.1221	0.1392	0.1651	0.1787	0.1843	0.1773
南充市	0.0422	0.0659	0.0840	0.0967	0.1097	0.1343	0.1562	0.1590	0.1835	0.1691
眉山市	0.0510	0.0677	0.0827	0.0985	0.1195	0.1468	0.1815	0.2007	0.1899	0.1857
宜宾市	0.0429	0.0607	0.0752	0.0867	0.1106	0.1290	0.1513	0.1599	0.1666	0.1621
广安市	0.0548	0.0760	0.0859	0.0983	0.1196	0.1392	0.1414	0.1491	0.1625	0.1605
达州市	0.0494	0.0571	0.0734	0.0919	0.1105	0.1316	0.1578	0.1541	0.1424	0.1540
雅安市	0.0640	0.0968	0.1077	0.1211	0.1401	0.1575	0.1765	0.2046	0.2364	0.2077
巴中市	0.0231	0.0547	0.0811	0.0912	0.1207	0.1470	0.1484	0.1555	0.1504	0.1561
资阳市	0.0427	0.0626	0.0756	0.0894	0.1133	0.1398	0.1590	0.1654	0.1664	0.1613
贵阳市	0.0767	0.0966	0.1404	0.1396	0.1620	0.1820	0.2245	0.2396	0.2557	0.2363
六盘水市	0.0220	0.0490	0.0728	0.0829	0.1123	0.1187	0.1393	0.1463	0.1564	0.1509
遵义市	0.0661	0.0601	0.0750	0.0906	0.1088	0.1288	0.1450	0.1562	0.1673	0.1611
安顺市	0.0283	0.0537	0.0749	0.0932	0.1097	0.1282	0.1444	0.1543	0.1601	0.1545
昆明市	0.0821	0.1128	0.1676	0.1635	0.1790	0.2062	0.2295	0.2482	0.2700	0.2506
曲靖市	0.0282	0.0391	0.0730	0.0828	0.1044	0.1275	0.1267	0.1337	0.1483	0.1446
玉溪市	0.0476	0.0746	0.0911	0.0971	0.1225	0.1384	0.1379	0.1549	0.1685	0.1636
保山市	0.0302	0.0412	0.0660	0.0817	0.0911	0.1089	0.1318	0.1397	0.1584	0.1463
昭通市	0.0236	0.0414	0.0654	0.0752	0.0885	0.1047	0.1215	0.1285	0.1358	0.1333
丽江市	0.0456	0.0757	0.0952	0.1038	0.1156	0.1341	0.1635	0.1670	0.1726	0.1671
普洱市	0.0340	0.0560	0.0742	0.0943	0.0970	0.1130	0.1340	0.1902	0.1670	0.1607
临沧市	0.0277	0.0556	0.0706	0.0865	0.1028	0.1202	0.1305	0.1473	0.1575	0.1485
西安市	0.1279	0.1925	0.2899	0.2149	0.2367	0.2710	0.2910	0.3156	0.3328	0.3181
铜川市	0.0578	0.0714	0.0841	0.0912	0.1110	0.1330	0.1479	0.1608	0.1738	0.1694
宝鸡市	0.0470	0.0716	0.0952	0.1017	0.1212	0.1368	0.1527	0.1662	0.1777	0.1727
咸阳市	0.0492	0.0732	0.0882	0.0928	0.1126	0.1366	0.1558	0.1651	0.1784	0.1726
渭南市	0.0348	0.0555	0.0763	0.0870	0.1038	0.1245	0.1371	0.1421	0.1489	0.1520
延安市	0.0404	0.0619	0.0678	0.0860	0.1180	0.1353	0.2142	0.2195	0.1705	0.1844
汉中市	0.0534	0.0805	0.0887	0.0989	0.1160	0.1358	0.1617	0.1607	0.1714	0.1709
榆林市	0.0478	0.0753	0.1528	0.1179	0.1115	0.1394	0.1432	0.1631	0.2234	0.1924
安康市	0.0489	0.0744	0.0902	0.0994	0.1185	0.1365	0.1531	0.1604	0.1691	0.1688
商洛市	0.0414	0.0566	0.0708	0.0814	0.1019	0.1140	0.1330	0.1773	0.2092	0.1780
兰州市	0.0639	0.0944	0.1274	0.1307	0.1525	0.1733	0.2023	0.2139	0.2514	0.2231
嘉峪关市	0.0583	0.0997	0.1799	0.1974	0.1534	0.1594	0.2058	0.2182	0.2471	0.2291
金昌市	0.0490	0.0710	0.0930	0.1311	0.1355	0.1638	0.1904	0.2051	0.2248	0.2029
白银市	0.0310	0.0559	0.0759	0.0918	0.1059	0.1213	0.1471	0.1772	0.2146	0.1793
天水市	0.0375	0.0591	0.0766	0.0970	0.1131	0.1335	0.1482	0.1515	0.1614	0.1584

---

武威市	0.0221	0.0456	0.0651	0.0932	0.1014	0.1229	0.1409	0.1429	0.1551	0.1506
张掖市	0.0418	0.0683	0.0859	0.0997	0.1271	0.1358	0.1642	0.1720	0.2009	0.1814
平凉市	0.0204	0.0487	0.0708	0.0939	0.1116	0.1292	0.1775	0.2575	0.3032	0.2283
酒泉市	0.0536	0.0783	0.1002	0.0959	0.1216	0.1410	0.1739	0.1866	0.1953	0.1862
庆阳市	0.0457	0.0544	0.0635	0.0953	0.1053	0.1130	0.1398	0.1543	0.1607	0.1533
定西市	0.0210	0.0395	0.0687	0.0683	0.0856	0.1067	0.1281	0.1366	0.1436	0.1401
陇南市	0.0120	0.0263	0.0650	0.0696	0.1031	0.1151	0.1318	0.0973	0.1528	0.1367
西宁市	0.0747	0.1026	0.1355	0.1222	0.1689	0.1938	0.2206	0.2674	0.3268	0.2659
银川市	0.0670	0.0959	0.1372	0.2202	0.1770	0.1732	0.1933	0.2032	0.2514	0.2274
石嘴山市	0.0641	0.0898	0.1007	0.1041	0.1243	0.1354	0.1625	0.1726	0.1715	0.1702
吴忠市	0.0391	0.0629	0.0778	0.0881	0.1233	0.1143	0.1322	0.1470	0.1496	0.1482
固原市	0.0222	0.0997	0.1250	0.0805	0.1081	0.1068	0.1340	0.1410	0.1488	0.1473
中卫市	0.0182	0.0461	0.0868	0.1002	0.1035	0.1186	0.1444	0.1489	0.1551	0.1502

---