

分类号 C8/380
U D C 0005604

密级 公开
编号 10741

兰州财经大学

LANZHOU UNIVERSITY OF FINANCE AND ECONOMICS

硕士学位论文

(专业学位)

论文题目 中国省域数字经济碳排放量测算及影响效应研究

研究生姓名: 陈俊松

指导教师姓名、职称: 韩君、教授

学科、专业名称: 统计学 应用统计

研究方向: 经济统计应用

提交日期: 2024年6月3日

独创性声明

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

学位论文作者签名： 陈俊松 签字日期： 2024.06.03

导师签名： 韩磊 签字日期： 2024.6.3

导师(校外)签名： _____ 签字日期： _____

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內容。

学位论文作者签名： 陈俊松 签字日期： 2024.06.03

导师签名： 韩磊 签字日期： 2024.6.3

导师(校外)签名： _____ 签字日期： _____

Calculation of Carbon Emissions and Impact Effect of Digital Economy in Chinese Provinces

Candidate : Chen Junsong

Supervisor: Han Jun

摘要

随着全球气候变暖问题日益突出,世界各国正大力推广低碳生活模式,并积极采取措施应对气候变化,致力于减少温室气体排放。中国同样对此作出郑重承诺,提出了“碳达峰”和“碳中和”的减排目标。中国正处于新发展阶段,数字经济成为社会发展提质增效的关键驱动因素,已深刻融入各类社会活动中,大数据、云计算等新兴数字技术的应用给碳减排提供了新的机遇。中国正向数字经济时代迈进,同时双碳目标是现阶段所面临的严峻挑战,数字经济降低碳排放的作用机理、数字经济碳排放量的测算及影响效应分析成为当前亟待探讨的问题和研究热点。

本文以数字经济的数字产业化和产业数字化分类为基础,结合2007、2012和2017年中国30个省份投入产出表准面板数据,编制中国数字经济投入产出表,测算各省份数字产业化部门和产业数字化部门的能源消耗量,由能源消耗量和该类能源对应的碳排放系数计算得出各省份数字产业化和产业数字化部门的碳排放量。构建出数字经济碳排放效应的LMDI分解模型,从能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应四个方面对全国层面和省域层面的数字经济碳排放效应进行因素分解。有助于推动各省联合减排,为制定有差别的、有针对性的碳减排政策提供依据,对中国提高碳减排效率、改善能源消费结构、推动低碳经济发展、实现碳减排目标具有重要意义。

研究结论显示:(1)产业数字化部门能源消耗量在数字经济能源消耗总量中占较大比重。(2)化石能源消耗产生的碳排放是数字经济能源消耗碳排放的主要构成部分。(3)数字产业化部门能源消耗多为清洁能源,产业数字化部门能源消耗多为化石能源。(4)能源消费效率效应对数字经济碳排放总量的增长具有抑制作用,能源结构强度效应、数字经济增长效应、人口规模效应对数字经济碳排放总量的增长起促进作用。结合上述结论,提出有针对性的对策建议。

关键词: 数字经济 能源消耗 碳排放 投入产出分析 LMDI 模型

Abstract

With the growing prominence of global climate change, countries worldwide are vigorously promoting low-carbon lifestyles and actively implementing measures to address climate change, focusing on reducing greenhouse gas emissions. China has also made a solemn commitment in this regard, setting forth its "carbon peak" and "carbon neutrality" emission reduction targets. In its new stage of development, digital economy has become a key driver for improving societal efficiency, deeply integrating into various social activities. The application of emerging digital technologies such as big data and cloud computing presents new opportunities for carbon reduction. As China strides towards the digital economy era, the dual carbon goals pose significant challenges. Understanding the mechanisms by which the digital economy reduces carbon emissions, calculating the volume of carbon emissions from the digital economy, and analyzing its impact effects have become pressing issues and research hotspots.

In this study, based on the categorization of digital industrialization and industrial digitization, we compiled a China Digital Industry Input-Output Table using standardized panel data from China's input-output tables in 2007, 2012 and 2017 across 30 provinces. We calculated the energy consumption of digital industrialization sectors and industrial digitization sectors towards coal, oil, natural gas, and power

sectors. By multiplying each province's energy consumption with the corresponding carbon emission coefficients for that type of energy, we obtained the carbon emissions from both digital industrialization and industrial digitization sectors in each province. We constructed an LMDI decomposition model to analyze the factors influencing the carbon emission effects of the digital economy at both national and provincial levels, breaking it down into four aspects: energy structure intensity effect, energy consumption efficiency effect, digital economic growth effect, and population scale effect. This approach helps promote joint emission reductions among provinces, providing a basis for formulating differentiated and targeted carbon reduction policies, thereby significantly contributing to enhancing China's emission reduction efficiency, achieving its carbon reduction goals, improving energy consumption structures, and fostering a low-carbon economy.

The research findings indicate: (1) The energy consumption of the industrial digitization sector accounts for a larger proportion in the total energy consumption of the digital economy. (2) Carbon emissions resulting from fossil fuel consumption constitute the primary component of carbon emissions from the energy consumption of the digital economy. (3) Energy consumption in the digital industrialization sector is mostly clean energy, while energy consumption in the industrial digitization sector tends to be fossil fuels. (4) The energy consumption efficiency

effect exerts an inhibitory role in the overall growth of carbon emissions from the digital economy; meanwhile, energy structure intensity effect, digital economic growth effect, and population scale effect all contribute to the increase in the total carbon emissions from the digital economy. Armed with these conclusions, targeted policy recommendations are proposed.

Keywords: Digital economy; Energy consumption; Carbon emissions; Input-output analysis; LMDI model

目录

1 绪论	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.1.1 研究背景.....	1
1.1.2 研究意义.....	1
1.2 文献综述.....	2
1.2.1 数字经济相关概念.....	3
1.2.2 数字产业分类.....	4
1.2.3 数字经济对碳排放的影响效应分析.....	4
1.2.4 文献评述.....	7
1.3 研究内容与方法.....	7
1.3.1 研究内容.....	7
1.3.2 研究方法.....	8
1.3.3 技术路线图.....	10
1.4 本文创新点.....	11
2 基础理论分析	12
2.1 理论基础.....	12
2.1.1 投入产出理论.....	12
2.1.2 数字经济投入产出表编制理论.....	12
2.1.3 LMDI 分解分析理论.....	13
2.2 数字经济发展影响能源消耗与碳排放的作用机理.....	14
2.2.1 数字经济发展影响能源消耗的作用机理.....	14
2.2.2 能源消耗变动影响碳排放的作用机理.....	15
2.3 本章小结.....	16
3 数字经济投入产出表编制与投入产出模型构建	17
3.1 数字经济产业的统计界定.....	17
3.2 数字经济产业投入产出表的编制.....	17
3.2.1 数字经济产业投入产出表编制思路.....	17

3.2.2 数字经济产业投入产出表的具体编制	19
3.3 投入产出模型构建	20
3.4 数据来源	21
3.5 本章小结	23
4 数字经济发展能源消耗量与碳排放量的测算	24
4.1 数字经济发展能源消耗量的测算	24
4.1.1 数字产业化部门对各省份能源消耗量的测算	26
4.1.2 产业数字化部门对各省份能源消耗量的测算	27
4.1.3 数字产业化部门与产业数字化部门能源消耗量的对比分析	28
4.2 数字经济发展能源消耗碳排放量的测算	30
4.2.1 数字产业化部门对各省份能源消耗碳排放量的测算	32
4.2.2 产业数字化部门对各省份能源消耗碳排放量的测算	33
4.2.3 数字产业化部门与产业数字化部门能源消耗碳排放量的对比分析	34
4.3 本章小结	36
5 数字经济碳排放效应的因素分解	37
5.1 LMDI 分解模型构建	37
5.1.1 平均迪氏指数分解法 (LMDI) 的基本模型	37
5.1.2 Kaya 公式	38
5.1.3 数字经济碳排放效应的 LMDI 分解模型	38
5.2 全国层面数字经济碳排放效应的 LMDI 分解分析	39
5.3 省域层面数字经济碳排放效应的 LMDI 分解分析	41
5.4 本章小结	46
6 结论及对策建议	47
6.1 结论	47
6.2 对策建议	48
参考文献	50

1 绪论

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

随着网络信息技术的不断创新发展，数字经济因其发展速度之快、辐射范围之广、影响程度之深越来越受到全世界关注。自 2011 年以来，中国数字经济增加值规模显著扩张，从 9.5 万亿元人民币激增至 2022 年的 50.2 万亿元人民币。在此期间，数字经济在国家整体经济结构中的贡献率逐年上升，至 2022 年已占据 GDP 的 41.5%。其中，数字产业化规模达 9.2 万亿元，占数字经济增加值比重的 18.3%；产业数字化规模达 41 万亿元，占数字经济增加值比重的 81.7%，数字经济的快速发展给碳减排提供了新的机遇。

在经济增长的同时，温室效应带来的全球气候变化引起了人们的高度重视。中国正处于密集开采资源并快速消耗的工业化发展阶段，以化石燃料为主的能源消费仍然是最广泛的能源消费方式，在带动经济发展的同时，碳排放造成的气候问题日益严峻。世界银行数据库统计资料显示，中国的碳排放量自 2001 年以后进入了高速增长阶段；2006 年中国的碳排放量超越美国成为世界碳排放第一大国；2010 年碳排放量为 35.27 亿吨，占世界碳排放总量的 14.88%；2019 年碳排放量增长至 107.07 亿吨，占世界碳排放总量的 31.17%。由此可见，中国正面临着严重的碳排放量增长问题。中国作为一个负责任的发展中国家，提出了力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和的战略目标。

国家“十四五”规划纲要将数字经济、新能源、创新等要素作为实现碳中和目标的关键支柱。数字经济在促进传统经济发展的同时，符合碳中和新一代技术的零碳、数字化和智能化特征。数字经济可以通过影响能源消费规模和改善能源结构、促进产业结构升级和数字技术创新等手段，实现经济增长从资源依赖向技术依赖转型，为中国提供巨大的减排潜力。当前中国正向数字经济时代迈进，同时双碳目标是现阶段所面临的严峻挑战，数字经济降低碳排放的作用机理、数字经济碳排放量的测算及影响效应分析成为当前亟待探讨的问题和研究热点。

1.1.2 研究意义

(1) 理论意义

拓宽数字经济投入产出表的编制内容,丰富数字经济研究内容。纵观现有研究,当前编制的数字经济投入产出表,其关注焦点主要集中在数字经济核心产业内部的资源流动,对融合了数字化技术的传统产业涉及不足。本文通过分离融合型数字经济中的数字化部分,编制中国数字经济投入产出表,对数字产业化部门和产业数字化部门的能源消耗碳排放效应进行了深入研究,对既有数字经济投入产出表编制框架进行深化并拓展了数字经济投入产出表的编制内容。此外,查阅相关文献发现,中国在数字经济领域的研究成果不断积累,但从多维度、全方位审视数字经济特别是环境影响方面的研究仍显滞后,对于数字经济碳排放效应的研究,大多局限于单一视角的探讨。本文使用 2007 年、2012 年和 2017 年中国投入产出表的准面板数据,通过界定、分离与合并中国 30 个省份 42 个部门投入产出表的数字化和非数字化部分,编制中国数字经济投入产出表,测算各省份数字产业化部门和产业数字化部门对不同能源的消耗量及碳排放量。构建具体的 LMDI 分解模型,定量分析了能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应对数字经济部门碳排放的影响;对各省数字经济碳排放效应进行因素分解,分析四类效应的贡献及区域差异。

(2) 现实意义

中国数字经济正步入高速发展阶段,在此背景下,以数字产业化和产业数字化两大分类为基石,设计并构建适用于数字经济发展的投入产出分析框架。参照国家统计局最新发布的《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》这一权威标准,对各门类类别进行合理的调整,整合划分为数字经济部门、能源部门和非能源部门。在数字经济产业投入产出表中,将数字经济部门独立分离出来,考察数字经济部门对石油、煤炭、电力、天然气等能源消耗的影响及数字经济消耗不同能源对碳排放的影响,分析数字经济发展影响碳排放的作用机制,并对中国省域数字经济的能源消耗及碳排放量进行测算和分析。基于测算的碳排放量,对数字经济的碳排放效应进行因素分解。有助于推动各省联合减排,为制定有差别的、有针对性的碳减排政策提供依据,对提高减排效率、实现碳减排目标,改善能源消费结构、推动低碳经济发展具有重要意义。

1.2 文献综述

伴随着数字经济在国民经济中重要性的持续提高以及对碳减排问题认知的

不断加强，研究的问题也随之深入，主要分为以下三个方面：

1.2.1 数字经济相关概念

“数字经济”这一术语由学者 Tapscott^[1]率先引入。随着时间推移，众多研究者开始对这一领域进行广泛而深入的研究，不同学者从各自的理论视角和研究目标出发，对数字经济的本质内涵进行了多角度的诠释与界定。Margherio^[2]认为数字经济的核心构成包括由网络技术支撑的数字支付系统和商品在线零售部分。Lane^[3]将数字经济简化理解为信息技术与计算机网络系统的集成体。Kling 等^[4]进一步强调了数字经济的本质特征，即数字经济是一种高度依赖于数字技术在生产、销售、创新和发展供应链各环节中的经济活动形态，并明确提及了 ICT 产品和服务以及电信行业是数字经济的关键组成部分。Miller 等^[5]从更广阔的视角诠释了数字经济，视之为各行各业广泛采用数字技术所催生的一种全新经济模式。Kim 等^[6]认为数字经济是依托信息技术，以数字形态进行商品与服务交易的各类经济活动。随着信息技术日新月异的进步和广泛应用，学术界对数字经济内涵的理解不断深化和完善。2010 年英国政府在 Kim 等人的观点基础上进一步扩展了数字经济的定义，纳入了数字技术对企业运营及发展的重要促进作用。Dahlman 等^[7]提出数字经济是一个建立在数字技术基础之上，并依赖网络开展活动的体系，不仅涵盖了支撑数字技术运行的物理设施，还包括接入网络所需的设备、各种应用程序，以及数字化产品和服务的应用领域。

国际学术界对数字经济本质的探索不断深化，普遍认同数字经济是以互联网和信息技术为基础开展的一类经济活动。国内学者在借鉴国外研究成果的同时，结合中国国情进行了本土化研究。康铁祥^[8]认为数字经济是围绕数字技术为核心所展开的新型经济活动，将其视为一种具有独立性的新经济模式。何泉吟^[9]将数字经济定义为在数字技术深刻影响下，制造、管理及流通等各个领域向数字化转型而形成的一种崭新的经济形态。逢建等^[10]认为数字经济是通过信息技术来实现数字化交易和交流的经济形态。金星晔等^[11]将数字经济界定为一种以基础设施和服务为依托，旨在促进经济活动整体数字化的产业活动，并强调数字技术和信息数据是提升生产和组织效能的核心要素。左鹏飞等^[12]认为数字经济是一种通过数据与传统生产要素深度融合，从而推动传统产业向更高层次转型升级的一种新经济业态。中国信通院最新发布的《中国数字经济发展研究报告（2023 年）》^[13]

提出数字经济是以数字化的知识和信息作为关键生产要素，以数字技术为核心驱动力量，以现代信息网络为重要载体，通过数字技术与实体经济深度融合，不断提高经济社会的数字化、网络化、智能化水平、加速重构经济发展与治理模式的新型经济形态。

1.2.2 数字产业分类

关于数字产业的分类研究，学术界经历了从覆盖范围有限、定义不够精准到全面且精确的发展阶段。Mesenbourg^[14]对数字经济进行了界定，将其划分为基础支撑设施、电子商务过程以及电子商务交易三大构成部分。随着数字经济发展不断壮大并受到国内外学者及政府统计机构的高度关注，分类研究也逐步细化和深入。康铁祥^[8]进一步将数字经济领域细分为电信及其他信息传输服务业、计算机服务与软件业、通信设备制造业在内的八大分支。中国信通院发布的《中国数字经济发展白皮书（2017年）》^[15]提出数字经济的构成包括两大部分：一是数字产业化，也称为数字经济基础部分，即信息产业，具体包括电子信息制造业、信息通信业、软件服务业等；二是产业数字化，也称为数字经济融合部分，包括传统产业由于应用数字技术所带来的生产数量和生产效率提升，其新增产出构成数字经济的重要组成部分。关会娟等^[16]充分考虑了既有的产业统计分类划分标准、兼顾国际可比性和可操作性等原则，将中国数字经济产业划分为五大类别：数字设备制造业、数字信息传输业、数字技术服务行业、数字内容与媒体行业以及互联网应用及相关服务行业。刘伟等^[17]参照 OECD 的分类框架，采取了一种更为聚焦的“窄口径”视角来定义和划分数字经济，具体涵盖了数字化赋能、数字内容、电子商务、智能设备制造与维修、数字管理以及数字人才教育与培训六大板块。韩君等^[18]通过对数字产业化与产业数字化概念的深入理解，认为中国数字产业的核心构成部分主要包括软件与信息技术服务业、互联网及其相关服务业、电信业、电子信息制造业及数字内容产业等领域。

1.2.3 数字经济对碳排放的影响效应分析

关于数字经济对碳排放的影响研究主要包括三个部分。

第一部分是通过量化分析数字经济产业的碳排放情况来探讨数字经济与碳排放之间的关系，这一部分研究可以细分为两类。一类是对数字经济产业特别是信息与通信技术产业自身的碳排放量进行测算。Anders 等^[19]在研究中预测了

2010 年至 2030 年间全球因通信技术所产生的电力消耗，并指出在最不利的情况下，通信技术的能源消耗可能会在 2030 年造成占据全球温室气体总量 23% 的碳排放量。Belkhir 等^[20]针对全球范围内的信息与通信技术产业碳排放足迹进行了评估，结果显示信息与通信技术产业对碳足迹的总贡献在 2020 年增长到 2007 年两倍以上，最高达到全球温室气体排放总量的 3.6%。渠慎宁等^[21]依据国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》，构建了一套专门用于衡量数字经济碳排放量的测算框架，发现近年来中国数字经济所引发的碳排放增长迅速，占全国碳排放总量的比重由 2008 年的 0.80% 攀升至 2018 年的 5.53%。

第二类是投入产出法在碳排放测算以及分析数字经济与碳排放关系中的应用。刘宇等^[22]运用投入产出法，将不同因素对二氧化碳排放量的影响进行了对比分析，结果显示，在碳排放量估算过程中是否将能源转化、资本形成总额以及出口相关的能源消耗等因素考虑在内，均会引起二氧化碳排放量测算的偏差。彭水军等^[23]利用世界投入产出数据库提供的数据，采用多区域投入产出模型对中国 1995 年至 2009 年间的生产侧和消费侧的碳排放量进行了详细的测算与对比分析，发现在这期间无论是从生产侧还是消费侧来看，中国的碳排放总量均有大幅度增长。杨丹辉等^[24]基于中国工业部门 2002 年至 2018 年的投入产出面板数据，分别计算了投入数字化水平和工业完全碳排放强度，并深入探讨了投入数字化水平对工业碳排放强度的影响。研究表明，投入数字化水平显著促进了工业领域碳排放强度的下降，而不同来源的投入数字化对降低工业碳排放强度的具体效果表现出差异性。王彬^[25]则将 2012 年、2015 年和 2017 年中国多区域投入产出表与世界投入产出表相结合，运用投入产出模型对中国 30 个省份内的 21 个行业数字经济规模及其在全球价值链中产生的碳排放量进行测算。研究结果显示，中国各省份的数字经济规模总体呈现上升趋势，并且发展数字经济对于降低全国范围内的碳排放具有正向作用。

第二部分是数字经济碳排放的影响因素分析以及基于 LMDI 模型对碳排放影响效应的因素分解进行研究。Ehrlich^[26]等提出了 IPAT 方程，认为人口、技术手段和经济发展水平是影响碳排放量的主要因素，将碳排放与这些因素建立起了联系。Du^[27]根据 1995 年至 2009 年的省级面板数据集，研究了能源碳排放的驱动力量、排放趋势和减少潜力，结果表明经济发展、技术进步和产业结构是

影响中国二氧化碳排放的最重要因素。Brantley^[28]通过分析年龄结构、城市化率、人口等对碳排放的影响,结果发现城市化率和碳排放之间存在正相关关系,而人口与碳排放呈现负相关。Ang^[29]基于 Kaya 恒等式,创新性地提出了 LMDI 分解方法,并对其原理进行了详细阐述,解决了模型中存在的残差问题,同时针对数据集中可能存在的零值情况提供处理方案,使该模型具备了无残差分解、应用范围广泛、操作便捷及解释清晰等特点。在此之后,众多研究者采用 LMDI 分解技术来分析碳排放的影响效应,研究碳排放现状以及预测未来发展趋势。郭朝先^[30]利用 LMDI 分解技术对中国 1995 年至 2007 年的碳排放量在产业层面和区域层面上进行了分解,研究表明中国经济总量的持续扩大是导致碳排放快速增长的主要原因,能源使用效率的提升在抑制碳排放增长方面起着关键作用,产业结构或地区结构的变化以及传统能源结构的调整对碳排放的影响相对较小。王瑛等^[31]借助 LMDI 分解法,从能源结构、能源强度、经济发展水平以及人口规模等多个维度出发,对影响碳排放的因素进行了细致的分解分析。结果显示,中国整体碳排放总量呈现上升趋势,其中东部与中部地区的省份相较于西部地区,更容易受到上述因素变化的影响。刘小丽等^[32]运用了 LMDI 完全分解模型对中国制造业在 2000 年至 2018 年间的碳排放驱动因素进行了深入探究。发现经济增长效应和产业结构效应是推动碳排放增长的两大主要动力,能源强度效应则显著地促进了制造业部门的碳排放降低,相比之下,能源结构效应与碳排放系数效应在推动制造业减排方面的影响较小。

数字经济对碳排放影响的第三部分研究是从多个角度探讨数字经济与碳排放之间的复杂关系,不同学者从全国到城市的不同层级上对这一问题进行了深入分析。从全国层面进行分析的有:谢云飞^[33]运用 2011 年至 2018 年的省级面板数据分析了数字经济发展对区域碳排放强度的影响及作用机制,发现数字经济主要通过推动有偏技术进步来减少碳排放强度,并指出这种影响存在明显的地区差异性。王硕等^[34]横向解析了数字经济与双碳目标之间的内在联系原理,认为相较于传统的工业化模式,数字经济对于实现双碳目标具有正面的影响作用,若对数字经济的管控力度不足,可能对未来达成双碳目标产生消极的效果。从城市层面进行分析的有:郭丰等^[35]运用 2011 年至 2019 年中国 223 个城市的面板数据构建了城市层面的数字经济发展指数,发现随着数字经济的发展,城市碳排放水平显著

降低,在拥有较高人力资本的城市、高科技财政投入较大的城市以及非资源型城市中,数字经济发展对减少碳排放的效应更为突出。张传兵等^[36]基于 2011 至 2019 年间中国 280 个地级及以上城市的面板数据分析了数字经济对碳排放强度的影响及其内在机制。研究表明,数字经济通过政府政策引导、企业行为变革和公众消费模式转变三个维度作用于城市碳排放强度,并且在特大城市与大城市以及非直辖市的城市群中,数字经济所体现的碳减排效果更为显著。

1.2.4 文献评述

通过系统梳理现有文献资料可以发现,随着数字经济的迅猛发展以及双碳目标的确立,关于数字经济碳排放量的测算以及数字经济对碳排放影响的研究已成为国内外学术界的关注焦点。尽管上述文献为量化数字经济的碳排放效应及深入探讨二者关系提供了重要的理论依据,但在分析过程中也显示出一些尚待解决的问题:

(1) 当前对于数字经济碳排放量的测算主要集中在信息与通信技术产业层面,尽管该产业是数字产业部门的核心构成部分,但并不能完全代表整个数字经济部门。因此,仅以 ICT 产业作为代表来评估整个数字经济领域的碳排放情况,可能会低估实际排放量,影响研究的严谨性和科学性。

(2) 中国乃至全球的数字经济正处于持续快速变革之中,相关产业分类和核心产品形态正不断演变,新兴的数字产品和服务层出不穷。在此背景下,依赖当前既定的数字产业范畴构建数字经济综合评价指标体系,并据此分析数字经济碳排放效应,所得结论可能存在不确定性。

(3) 目前针对中国省级行政区划数字经济碳排放的定量研究相对匮乏,难以深刻理解中国各地区数字经济碳排放的具体规律和作用路径,从而在一定程度上制约了相关政策的制定与有效实施。

1.3 研究内容与方法

1.3.1 研究内容

本文运用 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表的准面板数据,构建中国数字经济投入产出表,对中国省域数字经济的能源消耗及碳排放量进行测算和分析。同时基于测算的碳排放量,使用 LMDI 分解模型对数字经济碳排放效

应进行因素分解。

主要研究内容分为以下六个部分：

第一章，绪论。本章首先阐述了当前数字经济蓬勃发展和碳排放所引起气候问题日益严峻的时代背景以及本文的研究意义，随后梳理国内外文献，从数字经济的基本概念、数字产业分类以及数字经济对碳排放影响效应的研究进展等方面进行回顾总结，介绍研究的内容、方法、技术路线以及创新点。

第二章，基础理论分析。本章介绍了投入产出法、数字经济投入产出表编制和 LMDI 分解分析的相关理论基础，随后深度剖析了数字经济发展如何影响能源消耗以及能源消耗变化如何作用于碳排放的内在机制，为后续实证分析奠定了理论基础。

第三章，数字经济投入产出表编制与投入产出模型构建。结合国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》分类标准对数字经济产业进行了清晰地界定，随后对数字经济产业投入产出表编制思路 and 具体编制过程进行阐述，根据 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表的准面板数据分类合并重新编制出中国数字经济投入产出表，并构建投入产出模型。最后对文章使用数据的来源进行说明。

第四章，数字经济发展能源消耗量与碳排放量的测算。根据第三章编制的数字经济投入产出表，由完全消耗系数乘以相应部门的总产出得出数字产业化和产业数字化部门的能源消耗总产值。将各类能源消耗总产值除以对应年份各类能源价格，便可得到各类能源的消耗量。随后由各省份能源消耗量乘以该类能源对应的碳排放系数得到各省份数字产业化和产业数字化部门的碳排放量。

第五章，数字经济碳排放效应的因素分解。根据平均迪氏指数分解法(LMDI)的基本模型和 Kaya 公式构建出数字经济碳排放效应的 LMDI 分解模型，随后从能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应四个方面对全国层面和省域层面的数字经济碳排放效应进行分析。

第六章，结论与对策建议。本章通过上述的研究结果，总结归纳了全文的主要研究发现，并据此提出了针对性的政策建议。

1.3.2 研究方法

(1) 文献研究法

文献研究法主要通过系统地搜集、整理、分析并评价已发表的文献资料来获取和构建知识。通过对书籍、网络上相关论文和有关资料的大量检索,对数字经济内涵、数字经济产业分类、数字经济规模统计测度方法选择、数字经济发展对能源消耗与碳排放的影响分析方面的国内外相关文献资料进行整理、归纳与分析,为本文的研究提供有价值的参考。

(2) 分离系数法

由于数字经济融合部门既包含传统产业部分,又包含由于应用数字技术而带来生产数量和生产效率提升的数字化部分,因此需要对产业数字化部门进行分离,分离出其数字化部分和非数字化部分。

(3) 投入产出法

投入产出法,主要用来研究国民经济各部门之间以及各地区之间的相互联系、资源流动和依赖关系。该方法的核心工具为投入产出表,以二维矩阵形式呈现数据,横轴和纵轴分别代表不同生产部门或行业类别。通过深入分析投入产出表,可以精确计算出不同经济部门之间的相互作用,并能进一步研究政策调整、市场需求变化等外部因素如何通过产业链条逐层传导至整个宏观经济系统中。同时能够量化评估各行业对于能源消耗、碳排放等环保指标的具体影响程度。本文依据投入产出理论,编制中国数字经济投入产出表,建立中国数字经济投入产出模型。

(4) LMDI 分解法

平均迪氏指数分解法(LMDI)是一种在经济学、环境科学和能源统计等领域广泛应用的统计分析工具,用于分析影响总量指标变化的多个因素的贡献度,该方法最初由 Ang^[29]提出。LMDI 分解法的主要优点包括:能够处理零值或负值的情况,避免了传统指数分解法中因分母为零导致的问题;保证了分解结果的无残差性,各个因素对总变化量的贡献之和等于总量指标的实际变化;结果具有可加性和一致性,各分解因素之间的影响是独立的,且整体解释力强。通过 LMDI 分解法,研究者能够从不同维度对某个总量指标的变动进行结构性拆解,从而更深入地理解各个因素如何驱动总体变化趋势,并为制定相应的政策提供依据。

1.3.3 技术路线图

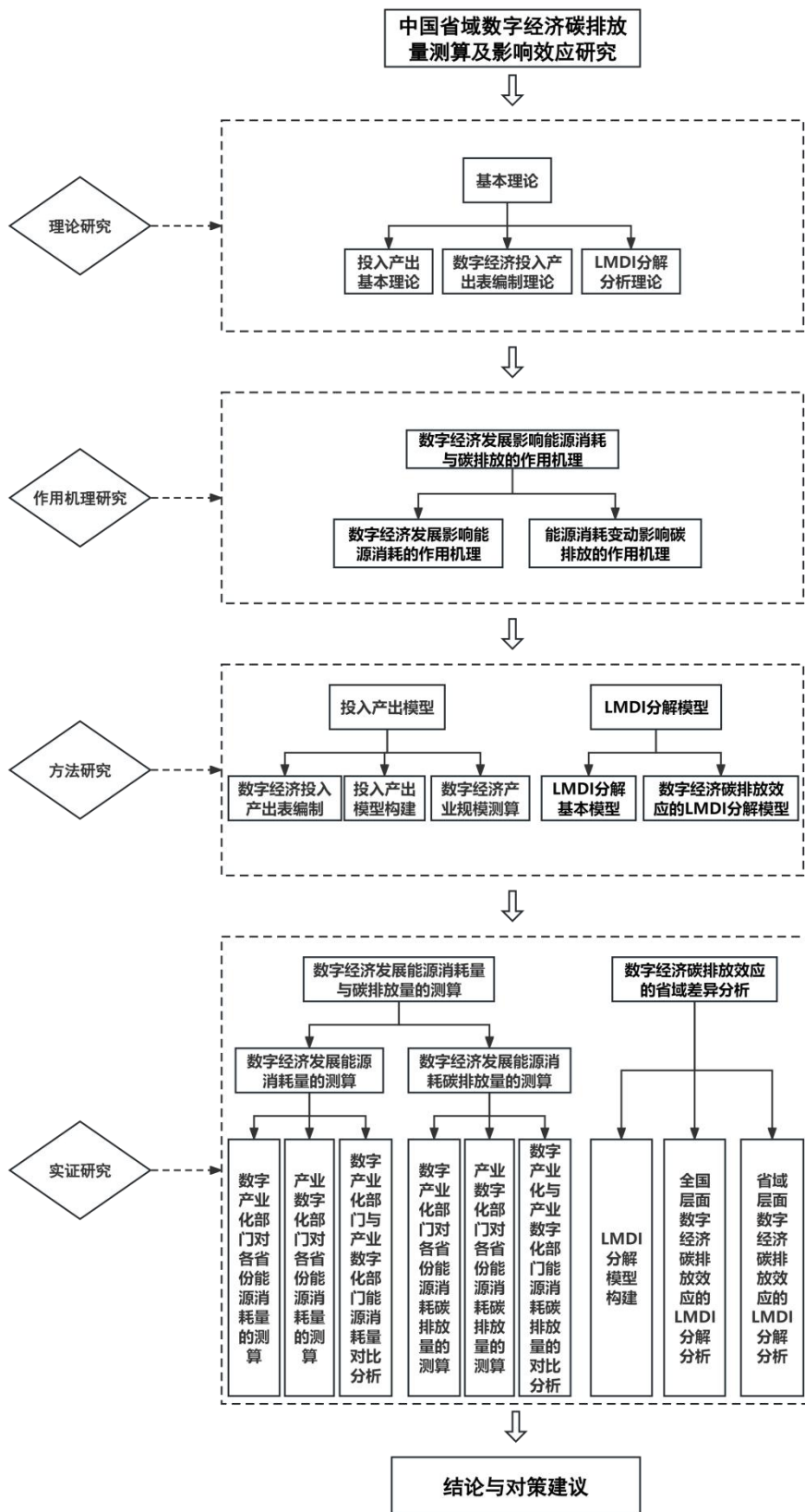


图 1.1 技术路线图

1.4 本文创新点

文章创新点主要体现在三个方面：

(1) 在数据使用上，利用 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表的准面板数据从时间和空间视角对中国省域数字经济的碳排放效应进行分析。

(2) 在方法使用上，本文基于投入产出的方法，编制中国数字经济投入产出表，通过表中第一象限数据计算出数字经济对能源消耗的直接消耗系数和完全消耗系数，测算数字产业化部门和产业数字化部门对石油、煤炭、电力和天然气的消耗量，再利用各类能源的碳排放系数测算出各省数字经济部门的碳排放量。

(3) 在研究内容上，根据测算出的数字经济部门碳排放量，采用 LMDI 分解法对各省数字经济碳排放效应进行因素分解，分析能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应的贡献及区域差异。

2 基础理论分析

本章从投入产出理论、数字经济投入产出表编制理论、LMDI 分解分析理论三个方面阐述文章涉及的相关理论,随后详细分析了数字经济发展影响能源消耗的作用机理以及能源消耗变动影响碳排放的作用机理,为后文数字经济发展能源消耗量与碳排放量的测算以及数字经济碳排放效应的因素分解提供理论基础。

2.1 理论基础

2.1.1 投入产出理论

投入产出理论的起源可追溯至 20 世纪 30 年代,经济学家瓦西里·列昂惕夫对美国不同行业间的相互关联性和资源流动展开了开创性研究。各行业之间的资源配置过程错综复杂,要精确揭示这些内在联系,需构建一种全新的经济学模型,即投入产出模型。该模型的建立基于一个假设:整个国民经济系统可以视为一个庞大的生产网络体系,在此框架内,每个部门的产出都依赖于其他部门的投入,同时也会向其他部门提供投入。通过投入产出模型,可以精细地量化各个经济部门间资源流动的具体情况,并预测经济变量随时间变化的趋势。基于投入产出表可以深入剖析国民经济各生产部门之间技术经济上的相互联系,计算出地区间的产业关联效应及动态演变特征,有助于深入了解产业结构及其时空变迁的特点。投入产出理论不仅为现代经济学的发展奠定了坚实基础,还丰富了宏观经济分析的手段,使得政策制定者能够更准确地评估政策影响、预测经济发展态势。

2.1.2 数字经济投入产出表编制理论

数字经济投入产出表编制理论是在传统投入产出分析方法的基础上,结合数字经济相关数据,构建一套反映数字经济发展中各部门之间经济联系、资源流动和相互依存关系的统计模型。数字经济投入产出表将数字产业作为一个独立的研究对象,并纳入国民经济整体运行体系中,通过量化数字经济部门与其他部门之间的直接消耗与间接消耗,以分析数字经济对整个经济系统的影响。贺铿^[37]首次提出在现有调查资料等相关数据的基础上,从全口径投入产出表中分解出信息产业投入产出表。曾昭磐^[38]在贺铿的基础上编制了 1987、1992 年厦门市的信息产业投入产出表,证明了该方法的合理性。分离系数法从全口径投入产出表中分离

出数字经济投入产出表的具体思路如下：（1）界定数字经济范围与分类标准。明确数字经济的定义和核算范围，根据国民经济行业分类标准，识别出纯粹的数字经济部门和包含数字经济成分的传统部门。（2）合并现有投入产出表。由于不同年份的投入产出表在行业分类上有所差异，为确保各年份投入产出表统计口径的一致性，需基于国民经济行业分类标准，对各年份投入产出表进行行业合并。（3）确定分离系数。根据已有研究成果，编制数字经济投入产出表的关键环节在于准确识别和分离传统部门中属于数字经济的部分。分离系数是指传统部门中数字经济部分在该部门中的占比，以此占比来将传统部门进行拆分。（4）扩充和完善投入产出表。在拆分传统部门的过程中，可能会出现一个原有部门需拆分为两个新部门的情况，因此需要根据实际研究需求调整 and 扩充合并后的投入产出表。（5）构建分离矩阵。分离系数是一维数据，而投入产出表则是面板数据，需要将分离系数转换为相应的分离矩阵，即将每个部门的分离系数与经过扩充处理的投入产出表一一对应匹配，生成列向量和行向量，二者相乘得到对应的分离矩阵。（6）拆分投入产出表。将扩展后的投入产出表各个象限与对应的分离矩阵进行矩阵乘法运算，便可得到所需的数字经济投入产出表。综上所述，数字经济投入产出表编制理论旨在通过科学合理的统计方法和数学模型，全面、系统地揭示数字经济在经济社会发展中的作用机理和环境影响，为制定数字经济相关的政策提供依据和参考。

2.1.3 LMDI 分解分析理论

因素分解法旨在将被研究的复杂变量合理拆分为多个影响因子，以深入探讨这些因子对目标变量变化的具体作用。在学术界广泛应用的因素分解法中，指数分解法（IDA）和结构分解法（SDA）尤为常见。结构分解法作为一种静态解析方法，通过对比投入产出模型核心参数的变化趋势来探究经济变动的原因。通常情况下，该方法会将经济系统内某个因变量的变化细分成与之相关的各自变量变化的叠加效应，从而估算每个独立自变量变化对因变量变化所做出的贡献^[39]。SDA 方法在实施时对于数据的要求较高，需要基于详细的投入产出数据进行分析，而这类数据往往难以获取。相对而言，指数分解法（IDA）对数据的需求较为宽松，仅需部门层面的时间序列汇总数据即可操作，适用于分解含有较少影响因素且带有时间序列特征的模型构建，是评估能源消耗、温室气体排放等关键因

素的有效途径^[40]。IDA 分解法还可以进一步划分为拉式指数分解法和对数指数分解法。对数平均迪氏指数分解法（LMDI）在分析过程中能够实现完全分解，即所有分解项之和等于被分解总量指标的实际变化量，不存在无法解释的残差部分，是一种相对完整的分解技术。这种方法通过有效处理，避免了可能存在的伪回归问题^[41]。相较于其他同类分解手段，LMDI 分解法在解决残差难题以及零值数据的处理上具有显著优势，并且所需的数据易于收集，计算过程简单快捷，所得出的结果具有唯一性和良好的可解释性，在探究碳排放相关影响因素方面展现出突出的优势。LMDI 分解法还可细分为乘法模型和加法模型，加法模型尤其适用于比较不同时期特定因素的变化，而乘法模型则更关注总体效应。总的来说，LMDI 分解分析理论提供了一种严谨的定量工具，有助于深入理解经济活动、能源使用与环境压力之间的内在联系。

2.2 数字经济发展影响能源消耗与碳排放的作用机理

数字经济对能源消耗与碳排放的作用方式和途径是构建数字经济的能源消耗效应与碳排放效应模型的理论基础。本章首先论述数字经济变动影响能源消耗的作用机理，然后在此基础上分析能源消耗变动影响碳排放的作用机理。

2.2.1 数字经济发展影响能源消耗的作用机理

数字经济发展能够充分发挥科学技术优势，使能源消费结构更为合理，促进可再生能源的消费，降低环境污染水平，提高能源利用效率^[42]。同时，数据是数字经济发展的核心要素，海量数据的储存传输和即时调用分析对于数字设备的算力和性能提出了更高要求，以大数据、互联网以及云计算等为主的信息技术设施建设、使用和维护需要消耗大量的电力^[43]。现阶段，中国电力供应仍然主要依靠化石能源燃烧，电力消耗的增加意味着化石能源消耗的增加。数字经济通过提高对电力需求规模进而提高了对化石能源的消耗，增加了能源消耗总量^[44]。

数字经济发展进程所带动的产业结构优化升级，会通过调整经济规模总量和结构布局，对社会整体能源消耗需求产生影响。数字经济领域中的信息通信技术产业单位增加值能耗为全国单位 GDP 能耗的 1/5，为全国单位工业增加值能耗的 1/9^[45]。随着数字经济的发展，数字技术、数字服务、数字信息渗透到传统产业生产、经营、销售的各个环节，促进传统产业改造，提升产业数字化水平，实现产业结构优化升级^[46]。产业结构升级通过改进资源利用效率，带动能源利用强度

的提升,并调整能源投入的初始结构,进而提高社会对能源资源的有效利用水平,从而影响能源消耗。

数字技术水平在数字经济发展的带动下快速创新提升。一方面,数字技术创新为企业提供了先进的生产设备与技术手段,有助于提高能源使用效率、削减单位产品的能源消耗成本,在一定程度上抑制了对能源消耗的需求。另一方面,数字经济部门为了保持其竞争优势并获取更高的利润回报,需要积极推动数字技术的市场化应用和持续创新升级,对清洁能源的需求不断增加,同时也促进了清洁能源开采技术的快速进步,有效扩大能源需求^[47]。由此可见,数字经济发展对能源消耗规模产生双重影响。从短期来看,数字经济发展能够通过技术创新的途径降低企业生产活动中的能源消耗;从长期来看,技术创新能够扩大经济发展对清洁能源消费的需求,进而扩大能源消耗。

2.2.2 能源消耗变动影响碳排放的作用机理

目前,化石燃料在中国经济生产的能源供应中占据主导地位,不仅燃烧过程会产生大量的碳排放,在开采和运输环节,大型开采设备的运行以及采用铁路、海运等方式进行运输时,也会产生碳排放。在中国的一次能源消费结构中,煤炭约占全国能源生产总量的75%,约占全国能源消费总量的65%。中国能源资源的特点表现为“富煤、贫油、少气”,这一特性决定了中国的能源消费主要依赖于煤炭资源^[48]。与煤炭和石油相比,天然气使用过程中排放的废气污染物较少。提供相等能量的情况下,天然气燃烧产生的二氧化碳为煤炭燃烧产生二氧化碳的56%,石油燃烧的71%。电力的来源有火力发电、水能发电、风能发电及核能发电,其中核能、风能和水能都属于可再生清洁能源,这些能源资源造成的碳排放远远低于化石能源燃烧产生的碳排放^[49],但局限于目前的技术水平和对风险的控制能力,这些能源没能成为当前能源使用的首选。

不同能源在资源开采、运输、加工及使用过程中均会产生不同程度的碳排放。随着数字经济规模持续扩大,无论是总体能源消费量还是各类能源的消费量都在不断攀升^[50]。因此,能源消费总量的增长通常会伴随着碳排放量的增加,这无疑给实现碳达峰和碳中和目标带来了持续的压力与挑战。但随着数字经济的发展,能源消费种类会呈现阶梯状的线性运动,展现出复杂的能源替代过程,这种阶梯状的消费倾向会优化能源消费结构,且更倾向于消费效率更高、污染更少的新能

源和替代能源^[51]。能源替代会带来能源价格的改变，传统能源和新能源之间出现的价格差异能够帮助各省份实现能源结构的优化，降低煤炭和石油等化石能源的消费占比，减少碳排放的产生^[52]。因此，数字经济发展既能够扩大能源消费规模，对碳减排产生负向影响，也能够优化能源消费结构，对碳减排产生正向影响。

2.3 本章小结

本章对投入产出理论、数字经济投入产出表编制理论和 LMDI 分解分析理论进行了详细的介绍。随后论述数字经济变动影响能源消耗的作用机理，然后在此基础上分析能源消耗变动影响碳排放的作用机理。短期内，数字经济发展带动的技术创新能够借助技术改进来降低企业在生产活动中的能源消耗总量。而从长远视角来看，数字经济的持续发展和技术进步也将不断推动经济规模扩大，从而增加对清洁能源消费的需求，间接导致能源消耗的增长。同时，数字经济发展既能够扩大能源消费规模，对碳减排产生负向影响，也能够优化能源消费结构，对碳减排产生正向影响。

3 数字经济投入产出表编制与投入产出模型构建

本章基于现有的数字经济产业统计分类体系，参照国家统计规范，确立数字经济产业统计分类和覆盖范围。在此基础上，详细阐述了编制数字经济产业投入产出表的具体思路和步骤，选择恰当的部门分离方法，构建数字经济产业投入产出表以及相应的投入产出模型。

3.1 数字经济产业的统计界定

自 20 世纪中叶以来，随着计算机、电子技术和信息技术的爆发式进步和革新，全球经济运作方式和人类生活模式经历了深刻的转变。为了准确衡量这一变化中的数字经济发展状况，经济合作与发展组织（OECD）引入了数字经济卫星账户的理念架构。该组织按照其核心经济活动将企业划分为六类：以数字技术为驱动力的行业、作为数字中介平台的行业、电子零售行业、其他类型数字业务行业、依赖数字中介平台的行业，以及其他非数字主导行业。美国经济分析局（BEA）率先采纳了 OECD 的数字经济发展概念框架，并据此构建数字经济产业分类体系。在美国的划分体系中，数字经济产业主要涵盖了三大组成部分：数字化基础设施、电子商务以及数字媒体。

为反映中国数字经济的快速发展，中国信通院发布《中国数字经济发展白皮书（2017 年）》从数字产业化和产业数字化两个方面为中国数字经济核算提供了统计标准和范围。其中数字产业化为产业数字化发展提供硬件、软件、技术服务和相关驱动要素的支撑，是以实现数据和数字技术应用为目的的产业；产业数字化为传统产业数字化转型后的产业，是以数据为生产要素，依靠数字技术进行货物和服务生产的产业活动^[53]。结合国家统计局发布的《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》分类标准，认为中国数字产业主要包括软件与信息技术服务业、互联网与服务业、电信业、电子信息制造业和数字内容产业 5 个行业^[54]。

3.2 数字经济产业投入产出表的编制

3.2.1 数字经济产业投入产出表编制思路

本文重新编制数字经济投入产出表的核心是对现有投入产出表进行合理的拆分与合并。投入产出表的编制思路如下：首先，对 42 个产业部门进行分类组合，着重细分能源部门和数字经济部门，其中数字经济部门分为数字产业化部门

与产业数字化部门, 再对二者进行细分; 其次, 分别在中间使用矩阵 (第一象限)、最终使用矩阵 (第二象限) 以及最初投入矩阵 (第三象限) 中单独分离出每行每列的数字化部分和非数字化部分, 分离出产业数字化部门的数字化部分的具体做法是将各省份产业数字化部门的 x_{ij} 乘以对应省份的分离系数 λ 得到该产业部门的数字化部分 λx_{ij} , 该产业部门的非数字化部分是 $(1 - \lambda)x_{ij}$, 分解过程如图 3.1 所示。

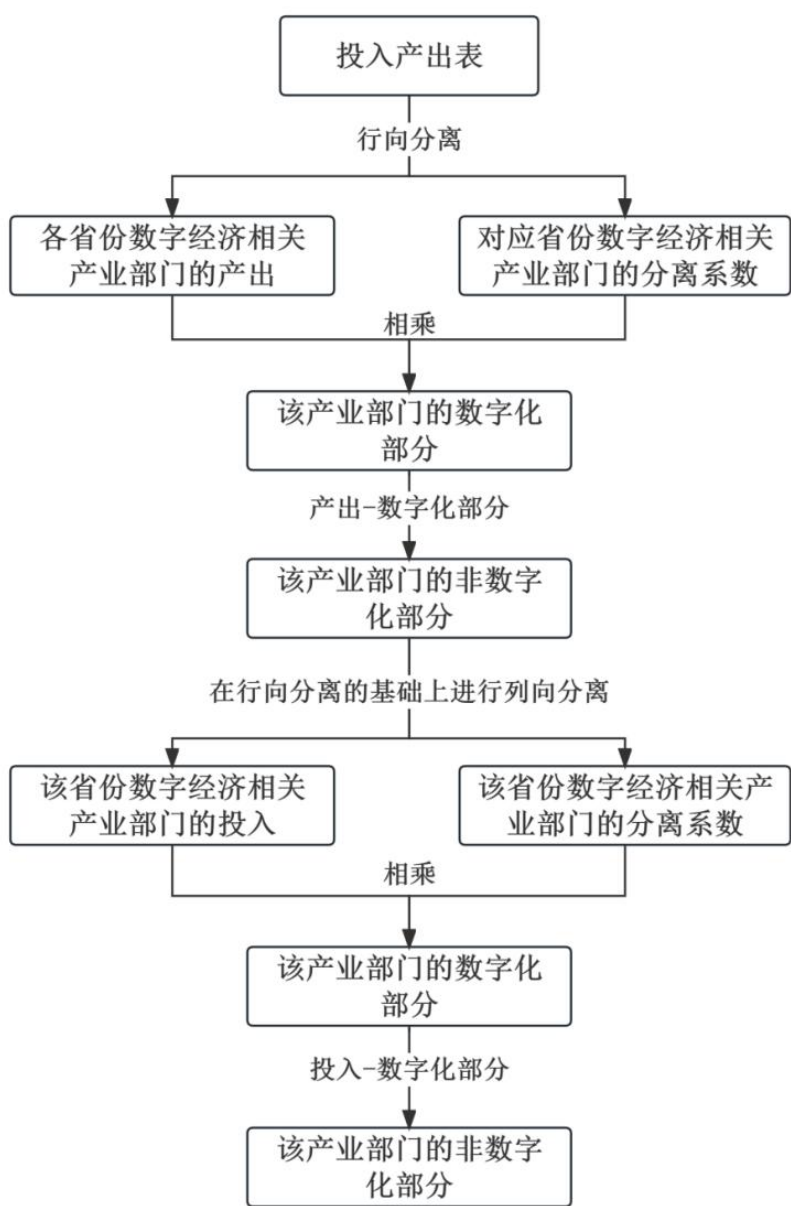


图 3.1 数字经济产业投入产出数据分解过程示意图

最后,对能源部门、数字经济部门以及非能源部门分别按列、按行进行合并,最终汇总求和各部门的中间使用、中间投入、增加值、总投入、总产出,编制完成 30 个省份的投入产出表。

3.2.2 数字经济产业投入产出表的具体编制

通过将中国数字产业与投入产出表 42 部门进行匹配与对应,将中国数字产业划分为 2 个数字产业化部门、9 个产业数字化部门及 31 个传统产业部门。产业数字化部门既包含原有传统产业的部分,也包含了运用数字技术后生产产量和生产效率得到提升的部分。因此,需要对产业数字化部门进行分离,分离出源自运用数字技术后生产产量和生产效率得到提升的数字化部分与传统的非数字化部分。参照曾昭磐^[38]运用“全口径”投入产出表编制信息产业投入产出表的方法,将其应用到 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表中。借鉴许宪春^[55]、朱发仓^[56]等人核算信息系数和数字经济增加值的方法,对产业数字化部门进行分离。产业数字化部门的分离系数为产业数字化增加值与国内生产总值扣除数字产业化增加值之差的比率。这里的产业数字化增加值指的是数字经济总量扣除了数字产业化增加值后的差值。针对某一特定部门,其数字化增加值可通过该部门的分离系数与该部门总增加值相乘得出,而该部门的非数字化增加值则是该部门总增加值减去其数字化增加值后的余额。

数字产业化部门涵盖通信设备、计算机及其他电子设备制造部门以及信息传输、软件开发和信息技术服务部门。将造纸印刷和文教体育用品部门、化学产品部门、通用设备部门、专用设备部门、电气机械和器材部门、仪器仪表部门、批发零售部门、金融部门、文化、体育和娱乐部门中含有的数字化部分通过分离系数对其进行分离,分离出产业数字化部门中数字化和非数字化部分后,将数字化部分保留,归为产业数字化部门。非数字化部分从产业数字化部门中剔除,归为传统产业部门。传统产业部门进一步细分为能源部门和非能源部门两大类。其中,能源部门分为包含煤炭采选产品的煤炭部门;包含石油和天然气开采产品、石油炼焦产品和核燃料加工品的石油部门;包含电力热力的生产和供应的电力部门;包含燃气生产和供应的天然气部门。非能源部门分为包含农林牧渔产品和服务的农业部门;包含造纸印刷和文教体育用品、化学产品、通用设备、专用设备、电气机械和器材、仪器仪表的非数字化部分以及交通运输设备、非金属矿物制品、

金属冶炼和压延加工品、金属制品、其他制造产品和废品废料、金属矿采选产品、非金属矿和其他矿采选产品、纺织品、纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品、木材加工品和家具、食品和烟草的制造业部门；包含批发和零售、金融、文化、体育和娱乐的非数字化部分以及交通运输、仓储和邮政、租赁和商务服务、教育、研究和试验发展的生产性服务业部门。

本文编制汇总的数字经济产业投入产出表基本表式如表 3.1 所示。

表 3.1 中国数字经济产业投入产出表

	产业部门	中间使用									最终使用			总产出	
		数字产业化	产业数字化	石油	煤炭	电力	天然气	农业	制造业	生产性服务业	消费	投资	出口		
中间投入	数字经济-数字产业化	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	f_{11}	f_{12}	f_{13}	q_1	
	数字经济-产业数字化	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}	x_{26}	x_{27}	x_{28}	x_{29}	f_{21}	f_{22}	f_{23}	q_2	
	能源部门	石油	x_{31}	x_{32}	x_{33}	x_{34}	x_{35}	x_{36}	x_{37}	x_{38}	x_{39}	f_{31}	f_{32}	f_{33}	q_3
		煤炭	x_{41}	x_{42}	x_{43}	x_{44}	x_{45}	x_{46}	x_{47}	x_{48}	x_{49}	f_{41}	f_{42}	f_{43}	q_4
		电力	x_{51}	x_{52}	x_{53}	x_{54}	x_{55}	x_{56}	x_{57}	x_{58}	x_{59}	f_{51}	f_{52}	f_{53}	q_5
		天然气	x_{61}	x_{62}	x_{63}	x_{64}	x_{65}	x_{66}	x_{67}	x_{68}	x_{69}	f_{61}	f_{62}	f_{63}	q_6
	非能源部门	农业	x_{71}	x_{72}	x_{73}	x_{74}	x_{75}	x_{76}	x_{77}	x_{78}	x_{79}	f_{71}	f_{72}	f_{74}	q_7
		制造业	x_{81}	x_{82}	x_{83}	x_{84}	x_{85}	x_{86}	x_{87}	x_{88}	x_{89}	f_{81}	f_{82}	f_{83}	q_8
		生产性服务业	x_{91}	x_{92}	x_{93}	x_{94}	x_{95}	x_{96}	x_{97}	x_{98}	x_{99}	f_{91}	f_{92}	f_{93}	q_9
		增加值	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	y_9				
	总投入	q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	q_7	q_8	q_9					

3.3 投入产出模型构建

首先，根据数字经济投入产出表中第一象限数据计算得出直接消耗系数矩阵，直接消耗系数 a_{ij} 指每生产单位 j 产品要消耗 i 种产品的数量，用该部门在生产经营中直接消耗的 i 产品部门的产品数量 x_{ij} 除以 j 产品部门的总投入 q_j ，计算公式为

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{q_j} (i, j = 1, 2, \dots, n) \tag{3.1}$$

记直接消耗系数矩阵为 A ,

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & L & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & L & a_{2n} \\ M & M & 0 & M \\ a_{n1} & a_{n2} & L & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

其次,通过直接消耗系数矩阵与单位矩阵运算得到列昂惕夫逆矩阵,从而得到数字产业化部门和产业数字化部门对能源部门的完全消耗系数矩阵。完全消耗系数 b_{ij} 是在生产单位最终产品过程中,对于某一产品 j 来说,对其他产品 i 所发生的全部消耗。完全消耗系数等于直接消耗系数与全部间接消耗系数之和,其矩阵形式记为 B ,计算公式为

$$B = (I - A)^{-1} - I \quad (3.3)$$

再次,完全消耗系数 b_{ij} 乘以相应部门的总产出 q_j 便可得到数字产业化和产业数字化部门对煤炭、石油、天然气和电力部门的能源消耗总产值; j 部门对 i 部门的能源消耗总产值 X_{ij} 的计算公式为

$$X_{ij} = b_{ij} \times q_j \quad (3.4)$$

最后,将各类能源消耗总产值除以对应年份各类能源价格,便可得到各类能源的消耗量,能源消耗量参照《中国能源统计年鉴》转变为标准统计量,乘以该能源对应的碳排放系数便可得到各省份数字产业化和产业数字化部门二氧化碳的排放量。

3.4 数据来源

鉴于数据的可用性和研究的严谨性,本文计算分离系数所采用的数据来源如下:数字产业化增加值和各行业增加值的数据收集于2007年、2012年及2017年中国30省份(限于数据的可得性,不包括西藏及港澳台地区)42部门投入产出表。2017年数字经济增加值的具体数值取自中国信息通信研究院在《中国数字经济发展与就业白皮书(2018年)》中提供的数据资料。其中,广东、江苏、山东、浙江、上海、北京、湖北、福建、河南、四川、河北、湖南、天津、安徽和辽宁的数字经济增加值可以直接取用,其余省份则通过其各省份GDP乘以数字经济占GDP比重的方式间接得出。贵州和云南参考了长江经济带上游地区数

据，其数字经济占比为 GDP 的 27.5%；江西参照长江经济带中游区域的标准，数字经济占 GDP 的比重为 27.1%；黑龙江和吉林以东北老工业基地地区的平均水平为依据，数字经济占 GDP 比重为 26%；陕西、甘肃、青海、宁夏和新疆五省采取西北地区数字经济占 GDP 比重，为 23.1%；重庆数字经济占 GDP 的比重为 31.7%，广西数字经济占 GDP 比重为 25.5%；鉴于数据可得性，山西、内蒙古和海南采用了数字经济占 GDP 比重的全国平均水准，为 25.4%^[57]。根据中国信息通信研究院发布的数据，可以获取 2005 年、2008 年、2011 年和 2014 年中国数字产业化和产业数字化增加值，但 2007 年和 2012 年的官方数据并未公开。鉴于 2007 年和 2012 年各省的相关数据严重缺乏，不足以支撑对各省分离系数的精确计算，故 2007、2012 年各省份的产业数字化部门的分离系数均采用了全国层面的总体分离系数替代。分别以 2005 年和 2008 年、2011 年和 2014 年的数据平均值来替代 2007、2012 年的产业数字化和数字产业化增加值。其中，2007 年产业数字化增加值和数字产业化增加值分别为 20323 亿元和 16804 亿元，2012 年的产业数字化和数字产业化增加值为 92422 亿元和 35847 亿元。通过以上数据计算得出 2007 年和 2012 年的分离系数分别为 8.0%和 18.4%。根据 2007、2012 年的分离系数计算出 2007 年和 2012 年中国数字产业化和产业数字化的增加值，以及中国各省的数字经济增加值，作为 2007 年和 2012 年数字经济投入产出表编制所需的数据来源。

鉴于中国的原油定价逐渐与国际接轨，选用 2007 年、2012 年和 2017 年 WTI 国际原油价格作为国内石油价格基准。中国煤炭资源主要集中于北方地区，其中，以秦皇岛港为首的环渤海港口群扮演着煤炭转运枢纽的角色，其煤炭价格常被视为市场走势的指向标。因此，2007 年、2012 年及 2017 年的煤炭价格参照秦皇岛煤炭市场价格。电力价格使用 2007、2012、2017 年的电网平均销售电价。据国家统计局数据，2017 年煤炭发电量占全国总发电量的 71.8%，鉴于此，数字产业电力消耗所对应的二氧化碳排放量以火力发电煤炭燃烧所产生的二氧化碳排放量来代替，供电煤耗为 320g/(kW·h)。天然气价格采用国家统计局发布的 2007、2012、2017 年液化天然气价格数据。碳排放系数遵循《综合能耗计算通则》及《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》提供的各类能源碳排放参考系数标准。

3.5 本章小结

本章对中国数字经济产业范畴进行界定与分类,基于对数字产业化与产业数字化的理解并结合国家统计局的行业划分规定,界定中国数字产业由软件与信息技术服务业、互联网与服务业、电信业、电子信息制造业和数字内容产业五个部分构成。对投入产出表中的各部门的数字化和非数字化部分进行分离与整合,编制中国数字经济产业投入产出表,该表包括数字产业化部门、产业数字化部门、由煤炭、石油、电力、天然气组成的能源部门,以及由农业、制造业和生产性服务业和其他产业组成的非能源部门。

4 数字经济发展能源消耗量与碳排放量的测算

各省份数字经济发展能源消耗量与碳排放量的测算是考察中国省域数字经济碳排放效应的关键步骤。鉴于此，本章运用所构建的数字经济投入产出表相关数据，测算各省份数字产业化部门和产业数字化部门的能源消耗量和碳排放量并进行对比分析。

4.1 数字经济发展能源消耗量的测算

根据 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表的准面板数据重新编制中国数字经济投入产出表，由完全消耗系数乘以相应部门的总产出得出数字产业化和产业数字化部门对煤炭、石油、天然气和电力部门的能源消耗总产值，将能源消耗总产值除以对应年份各类能源价格，得到各类能源的消耗量如表 4.1 所示。

表 4.1 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济部门能源的消耗量

省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)	省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)
北京	数字产业	2007	2869.46	2.28	146.09	12.85	河南	数字产业	2007	22804.67	215.65	875.75	4.39
		2012	29.23	2.10	11331.92	50.38			2012	12873.56	76.44	5985.39	6.71
	产业化	2017	35.54	3.38	42.24	3.54		产业化	2017	1892.31	5.54	57.97	1.53
		2007	1042.72	103.46	390.76	5.74			2007	11812.03	641.93	1115.32	13.42
	数字化	2012	38125.37	1031.52	31826.65	393.81		数字化	2012	159703.0	5809.65	22598.05	825.28
		2017	4412.95	1600.55	2522.43	57.48			2017	45861.70	343.05	11141.40	33.75
天津	数字产业	2007	121.26	63.55	402.67	6.40	湖北	数字产业	2007	532.79	10.91	19682.10	2.45
		2012	1076.07	24.72	28.85	2.47			2012	11.36	2.64	839.90	0.03
	产业化	2017	4.14	87.19	61.11	3.08		产业化	2017	137.54	11.99	6327.01	25.93
		2007	681.95	596.54	1791.40	6.81			2007	566.85	268.71	3096.89	4.05
	数字化	2012	230596.28	5585.45	50680.46	184.41		数字化	2012	848.60	404.71	72181.91	86.36
		2017	848.18	2453.64	16833.96	59.64			2017	3335.03	5869.86	12365.78	1711.70
河北	数字产业	2007	596.99	26.53	167.01	1.94	湖南	数字产业	2007	10413.75	62.54	320.74	2.70
		2012	469.28	19.97	414.59	47.03			2012	1000.10	1.73	130.04	11.63
	产业化	2017	129.83	6.02	145.55	0.66		产业化	2017	218.00	2.42	397.87	36.42
		2007	3977.49	497.19	1230.45	8.10			2007	10313.44	109.41	695.18	143.22
	数字化	2012	63163.97	4763.25	65981.77	432.59		数字化	2012	78509.75	3563.11	28806.46	443.77
		2017	8526.35	1592.67	3123.03	13.10			2017	2675.83	118.82	3689.43	22.07
山西	数字产业	2007	15517.88	67.62	818.75	6.60	广东	数字产业	2007	0.00	273.14	683.66	12.70
		2012	268905.66	5143.37	17623.14	35.11			2012	0.00	32.48	2582.72	636.20
	产业化	2017	398957.94	5399.40	1051.42	29.91		产业化	2017	1.54	103.12	712.45	33.12
		2007	48736.32	1893.30	4317.50	29.74			2007	0.00	397.46	2254.88	25.19
	数字化	2012	986704.69	10766.78	35672.11	157.57		数字化	2012	0.00	11952.03	17153.64	2349.02
		2017	2074162.03	10316.20	39023.03	389.25			2017	3.85	2614.06	9364.82	2170.06

续表 4.1 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济部门能源的消耗量

省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)	省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)
内蒙古	数字	2007	474.25	3.25	16.50	0.12	广西	数字	2007	38.70	0.05	51.11	0.56
	产业	2012	507.42	2.63	1614.91	0.32		产业	2012	332.72	3.57	314.48	6.71
	化	2017	55.80	3.36	18.88	0.53		化	2017	182.10	345.92	1041.94	18.69
	产业	2007	9137.01	133.53	343.11	43.06		产业	2007	307.28	2.97	881.18	0.25
	数字	2012	151361.18	534.70	33632.42	24.41		数字	2012	5052.03	2924.46	15079.67	44.89
	化	2017	398634.58	1606.61	24432.81	730.36		化	2017	4648.66	3303.52	32156.97	140.36
辽宁	数字	2007	884.95	124.92	84.28	6.19	海南	数字	2007	0.00	203.05	35.76	0.89
	产业	2012	25891.91	80.46	4191.11	101.72		产业	2012	0.00	26.83	9995.99	4.78
	化	2017	1.41	2.57	31.82	0.11		化	2017	0.00	0.41	20.00	0.36
	产业	2007	6269.96	1964.28	3151.74	22.25		产业	2007	0.00	138.66	127.49	1.63
	数字	2012	112476.81	17401.67	57466.49	511.47		数字	2012	0.00	4918.97	8388.27	54.90
	化	2017	1131.74	1222.21	8132.75	25.20		化	2017	0.00	6910.81	9522.78	28.45
吉林	数字	2007	155.31	7.81	12.46	1.82	重庆	数字	2007	378.01	0.82	30.72	8.80
	产业	2012	780.71	6.75	97.43	0.34		产业	2012	2857.19	106.50	173.22	10.15
	化	2017	144.30	4.70	33.57	0.93		化	2017	512.31	69.77	2211.31	1058.63
	产业	2007	2055.34	154.22	220.06	5.61		产业	2007	2825.24	16.93	652.78	13.12
	数字	2012	79456.38	3423.14	4068.50	71.07		数字	2012	5490.27	205.62	1239.80	23.33
	化	2017	202796.38	717.61	1625.45	176.74		化	2017	163189.8	4344.10	38017.67	3526.06
黑龙江	数字	2007	12740.28	278.63	3544.17	19.45	四川	数字	2007	10840.02	409.66	396.56	3.61
	产业	2012	435687.48	122.32	1653.46	0.38		产业	2012	90950.23	1271.03	4492.22	46.03
	化	2017	916.15	40.56	141.81	5.51		化	2017	1588.93	19.77	2887.77	22.41
	产业	2007	7862.11	210.21	1013.66	2.78		产业	2007	22453.91	592.42	2906.79	39.44
	数字	2012	58417.49	2923.35	15911.25	441.31		数字	2012	397838.9	3264.49	35257.88	502.11
	化	2017	44090.52	6703.01	24752.40	268.16		化	2017	54611.86	879.67	11196.99	165.85
上海	数字	2007	0.00	55502.27	79137.23	2891.44	贵州	数字	2007	1471.00	1.45	55.32	0.21
	产业	2012	0.00	15.08	27102.34	17.11		产业	2012	18722.98	1.16	496.69	0.67
	化	2017	0.00	0.85	24.74	0.46		化	2017	19511.04	0.87	791.57	2.89
	产业	2007	0.00	1039.54	1236.03	13.16		产业	2007	8431.00	225.33	1425.25	5.34
	数字	2012	0.00	623.98	3746.52	81.68		数字	2012	50527.80	615.82	12866.92	63.67
	化	2017	0.00	155.53	246.50	34.77		化	2017	111271.8	943.36	43206.58	581.65
江苏	数字	2007	1988.01	589.01	6983.11	12.81	云南	数字	2007	268.17	64.36	3711.46	2.50
	产业	2012	258.52	6.26	4576.99	28.45		产业	2012	5032.99	25.48	1167.23	2.00
	化	2017	43.91	1.01	15.93	6.19		化	2017	10557.49	7.63	480.04	1.43
	产业	2007	4854.44	486.92	10069.43	29.87		产业	2007	4493.04	53.83	2172.70	4.53
	数字	2012	28996.14	302.75	101475.0	337.57		数字	2012	103475.1	989.03	42896.80	62.64
	化	2017	4659.83	360.01	7298.50	31.44		化	2017	138588.0	7305.46	93669.42	136.01
浙江	数字	2007	5.88	108.05	1791.14	5.31	陕西	数字	2007	617.26	55.58	32.83	1.14
	产业	2012	23584.77	26.99	18936.73	10.95		产业	2012	254802.9	25.51	448.11	3.38
	化	2017	2725.90	4.85	1748.02	6.64		化	2017	7459.36	13.06	279.70	12.97
	产业	2007	80.78	494.03	2982.82	15.65		产业	2007	5851.01	163.00	297.72	2.34
	数字	2012	186.00	5641.03	29648.83	407.67		数字	2012	218862.8	2639.80	7961.39	79.44
	化	2017	13.46	5574.31	3116.04	76.09		化	2017	157776.8	3204.20	33539.40	214.51

续表 4.1 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济部门能源的消耗量

省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)	省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (万 L)	电力 (万度)	天然气 (万 m ³)		
安徽	数字产业	2007	451.91	1.58	550.56	0.45	甘肃	数字产业	2007	253.63	38.11	61.88	0.33		
		2012	154.17	0.88	89.86	0.23			2012	2367.03	5.06	325.33	24.37		
	数字化	2017	29.72	0.29	46.69	0.85		数字化	2017	70.35	7.26	64.85	0.08		
		2007	5413.67	405.15	2378.99	60.24			2007	1182.02	194.44	297.63	1.00		
	福建	数字产业	2012	110469.39	2650.31	18915.48		38.83	青海	数字产业	2012	21541.53	3367.53	3983.54	95.97
			2017	10018.23	191.99	14064.89		42.00			2017	69622.55	4816.62	21843.79	25.05
数字化		2007	3868.54	32.84	1693.93	17.32	数字化	2007		234799.9	22.70	11.57	0.01		
		2012	29728.76	13.41	11746.65	5.01		2012		42.72	30.52	73.79	0.05		
江西		数字化	2017	124.33	2.15	533.03	15.85	宁夏		数字化	2017	1.06	1.90	1.11	0.29
			2007	3214.79	1073.13	868.57	1.28				2007	215.98	9.34	58.97	0.03
	数字产业	2012	5870.52	3299.62	23579.37	177.53	数字产业		2012	6099.83	254.52	5633.86	0.35		
		2017	578.57	187.44	5357.85	183.51			2017	1117.62	83.94	11775.73	0.88		
	山西	数字产业	2007	1914.81	3.39	243.16	3.27		宁夏	数字产业	2007	2075.95	5.06	191.56	4.99
			2012	54354.10	37.27	9146.51	20.01				2012	2089.82	1.44	27.86	0.59
数字化		2017	111.89	1.94	142.74	2.19	数字化	2017		146.53	1.17	90.62	5.30		
		2007	5655.32	40.94	614.77	0.96		2007		585.87	7.21	266.98	0.83		
山东		数字产业	2012	51974.17	1386.05	5985.20	75.83	新疆		数字产业	2012	29118.34	174.68	2656.13	53.50
			2017	58404.83	1085.34	52097.96	315.22				2017	46846.28	5238.52	33738.05	1166.08
	数字化	2007	38204.83	1949.09	3148.51	3.55	数字化		2007	359.52	35.04	108.49	0.76		
		2012	130915.80	1654.10	8675.56	16.21			2012	968.41	10.56	67.19	0.10		
	新疆	数字化	2017	30978.20	9169.30	517177.18	63.22		新疆	数字化	2017	333.78	69.81	1520.20	2.13
			2007	113284.06	2778.45	10974.00	17.46				2007	1890.49	418.84	560.45	2.40
数字产业		2012	1233951.70	51863.35	174156.62	1442.09	数字产业	2012		36315.69	8149.28	5733.74	75.65		
		2017	524144.95	17547.53	109606.75	454.74		2017		34065.88	1632.74	34443.78	148.90		

4.1.1 数字产业化部门对各省份能源消耗量的测算

2007、2012、2017 年数字产业化部门煤炭消耗量呈持续增长态势的有山西、贵州、云南 3 个省份。石油消耗量呈持续增长态势的有山西、广西 2 个省份。电力消耗量呈持续增长态势的有山东、广西、重庆、贵州 4 个省份。天然气消耗量呈持续增长态势的有内蒙古、山东、湖南、广西、重庆、贵州、陕西、青海 8 个省份。数字产业化部门对这些省份能源消耗的拉动作用日益增强，对数字产业能源消耗的影响不断加大。从时间维度上，数字产业化部门煤炭消耗量呈持续降低态势的有河北、上海、江苏、湖南、青海 5 个省份。石油消耗量呈持续降低态势的有河北、辽宁、吉林、黑龙江、上海、江苏、浙江、安徽、福建、河南、贵州、云南、陕西、宁夏 14 个省份。电力消耗量呈持续降低态势的有黑龙江、上海、江苏 3 个省份。天然气消耗量呈持续降低态势的仅有上海 1 个省份。数字产

业化部门对这些省份能源消耗的拉动水平较低,对数字产业生产能源消耗的影响有待提高。

2017年数字产业化部门对煤炭消耗量超过1000吨的省份有山西、山东、贵州、云南、陕西、浙江、河南、四川八个省份。山东和山西数字产业化部门的石油消耗量分别为9169.30万L和5399.40万L,其他省份的石油消耗量较少,均不足500万L。数字产业化部门的电力消耗量超过1000万kW·h的省份为山东、湖北、四川、重庆、浙江、新疆、山西、广西。重庆、山东、湖南、广东、山西、湖北、四川、广西、福建、陕西数字产业化部门的天然气消耗量高,其他省份均不足10万m³。

数字经济发展水平较高的省份主要分布在东部及南部沿海地区,这些省份数字产业规模更大,并且聚集了大数据、互联网、人工智能等高技术行业,数字技术创新及应用水平更高,在大力发展数字经济、建设数字产业基础设施的同时,更加注重对资源环境的保护。以上海为例,2017年上海数字产业化部门电力消耗量为24.74万kW·h,天然气消耗量为0.46万m³,石油消耗量为0.85万L。2017年上海煤炭采选部门总投入为0,因此数字产业化部门煤炭消耗量同样为0。在数字经济发展水平相对缓慢的中部地区以及西南的川渝两省,数字产业发展滞后,可利用资源相对较少,地理优势不明显。但这些省份的产业基础良好,数字产业化发展前景优异。以重庆为例,2017年重庆数字产业化部门的能源消耗量分别为煤炭512.31吨、石油69.77万L、电2211.31万k·Wh、天然气1058.63万m³。在数字经济发展水平较高的省份,数字产业化部门能源消耗以电力、天然气等清洁能源为主。

4.1.2 产业数字化部门对各省份能源消耗量的测算

2007、2012、2017年产业数字化部门煤炭消耗量呈持续增长态势的有山西、内蒙古、吉林、江西、湖北、广东、重庆、贵州、云南、甘肃、宁夏11个省份。石油消耗量呈持续增长态势的有北京、内蒙古、黑龙江、湖北、广西、海南、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、宁夏12个省份。电力消耗量呈持续增长态势的有山西、黑龙江、江西、广西、海南、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆13个省份。天然气消耗量呈持续增长态势的有山西、吉林、福建、江西、湖北、广西、重庆、贵州、云南、陕西、青海、宁夏、新疆13个省份。

产业数字化部门有效发挥了数字技术对传统行业的替代与渗透效能,有力地推动了各省份能源消耗的增长。从时间维度上,产业数字化部门煤炭消耗量呈持续降低态势的有上海、海南 2 个省份,其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长,在 2012 至 2017 年间降低的态势。石油消耗量呈持续降低态势的仅有上海 1 个省份,其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长,在 2012 至 2017 年间降低的态势。电力消耗量除持续增长的省份外,其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长,在 2012 至 2017 年间降低的态势。天然气消耗量除了安徽在 2007 至 2012 年间降低,在 2012 至 2017 年间增长外,其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长,在 2012 至 2017 年间降低的态势。

2017 年产业数字化部门的煤炭消耗量较高的省份有山西、山东、内蒙古、吉林、重庆、陕西、云南、贵州,其他省份的消耗量不足 10 万吨。产业数字化部门对石油消耗量较高的省份有山东、山西、云南、海南、黑龙江、湖北、浙江、宁夏、甘肃、重庆、广西、陕西、广东、天津、新疆、内蒙古、北京、河北、辽宁、江西,其他省份的石油消耗量不足 1000 万 L。产业数字化部门的电力消耗量较高的省份有山东、云南、江西、贵州、山西、重庆、新疆、宁夏、陕西、广西,其他省份用电量均低于 3 亿 kW·h。重庆产业数字化部门天然气消耗量最大,高达 3526.06 万 m³,广东、湖北、宁夏的天然气消耗量分别为 2170.06 万 m³、1711.70 万 m³、1166.08 万 m³。其他省份的天然气消耗量均不足 1000 万 m³。

数字经济发展水平较低的省份主要分布在西北、东北地区。西北地区依托“东数西算”等政策,建设算力枢纽,为数字产业发展带来新的机遇,但西北地区初始数字经济发展水平较低、产业结构单一,存在产业升级和经济转型的瓶颈。东北三省的产业以重工业为主,产业转型、结构升级速度缓慢,导致数字经济发展水平较低。当数字经济发展水平较低,数字技术并未达到一定高度时,产业数字化部门建设会带来大量的化石能源消耗。以山西和山东为例,其产业数字化部门对煤炭的消耗量分别为 207.42 万吨、52.41 万吨,对石油的消耗量分别为 10316.20 万 L、17547.53 万 L。可以看出,在数字经济发展水平较低的省份,产业数字化部门煤炭、石油等化石燃料消耗占能源消耗的比重较大。

4.1.3 数字产业化部门与产业数字化部门能源消耗量的对比分析

数字产业化部门煤炭消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济煤炭消

耗总量的 56.57%、23.54%、10.29%，产业数字化部门煤炭消耗量分别占比 43.43%、76.46%、89.71%。数字产业化部门石油消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济石油消耗总量的 79.92%、5.16%、13.46%，产业数字化部门石油消耗量分别占比 20.08%、94.84%、86.54%。数字产业化部门电力消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济电力消耗总量的 68.16%、13.37%、43.05%，产业数字化部门电力消耗量分别占比 31.84%、86.63%、56.95%。数字产业化部门天然气消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济天然气消耗总量的 85.39%、10.25%、9.53%，产业数字化部门天然气消耗量分别占比 14.61%、89.75%、90.47%。数字产业化部门对煤炭和天然气的消耗量占数字经济煤炭和天然气消耗总量的比重持续下降，产业数字化部门对煤炭和天然气的消耗量占数字经济煤炭和天然气消耗总量的比重持续上升。数字产业化部门对石油和电力的消耗量占数字经济石油和电力消耗总量的比重在 2007 至 2012 年间大幅下降，在 2012 至 2017 年间占比上升，产业数字化部门对石油和电力的消耗量占数字经济石油和电力消耗总量的比重与之相反。

2017 年中国数字产业化部门与产业数字化部门煤炭消耗总量为 464.30 万吨。数字产业化部门煤炭消耗量为 47.69 万吨，占比 10.27%，产业数字化部门煤炭消耗量为 416.60 万吨，占比 89.73%。数字产业化部门与产业数字化部门石油消耗总量为 11.43 亿 L。数字产业化部门石油消耗量为 1.54 亿 L，占比 13.46%，产业数字化部门石油消耗量为 9.89 亿 L，占比 86.54%。数字产业化部门与产业数字化部门电力消耗总量为 125.00 亿 kW·h。数字产业化部门电力消耗量为 53.81 亿 kW·h，占比 43.05%，产业数字化部门电力消耗量为 71.19 亿 kW·h，占比 56.95%。数字产业化部门与产业数字化部门天然气消耗总量为 1.43 亿 m³。数字产业化部门天然气消耗量为 1361.86 万 m³，占比 9.53%，产业数字化部门天然气消耗量为 1.29 亿 m³，占比 90.47%。

整体上看，2012 年后产业数字化部门的能源消耗量高于数字产业化部门。然而，2017 年浙江数字产业化部门的煤炭消耗量、山东数字产业化部门的电力消耗量均高于产业数字化部门的消耗量。浙江省在全面实施数字经济“一号工程”的过程中，提出全面推进经济的数字化转型，争创国家数字经济示范省，大力推进互联网、大数据、人工智能和实体经济的深度融合，在数字产业化方面成效卓

著。因此浙江数字产业化部门的煤炭消耗量超过产业数字化部门的煤炭消耗量，达到 2725.90 吨。2017 年山东数字产业化部门的电力消耗量在数字经济部门电力消耗总量中占比 82.51%，一方面得益于山东是中国重要的工业基地和发电大省，2017 年山东省发电 5575 亿 kW·h，占全国发电总量的 8.74%，在各省份中排名第一。另一方面，山东省传统产业、重化工业占比较高，持续推进“工赋山东”“云行齐鲁”等一系列专项行动，大力推进数字产业化发展。

4.2 数字经济发展能源消耗碳排放量的测算

将表 4.1 中各省份能源消耗量乘以该能源对应的碳排放系数便可得到各省份数字产业化和产业数字化部门的碳排放量，如表 4.2 所示。

表 4.2 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济碳排放量

省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (吨)	电力 (吨)	天然气 (吨)	合计 (吨)	省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (吨)	电力 (吨)	天然气 (吨)	合计 (吨)
北京	数字产业化	2007	7728.28	63.04	1259.09	298.87	9349.27	河南	数字产业化	2007	61419.48	5956.26	7547.67	102.19	75025.59
		2012	78.73	57.93	97664.25	1171.56	98972.47			2012	34672.17	2111.19	51585.16	156.00	88524.52
		2017	95.71	93.36	364.04	82.27	635.37			2017	5096.52	152.96	499.60	35.64	5784.72
	产业数字化	2007	2808.34	2857.48	3367.76	133.49	9167.08	湖北	数字产业化	2007	31813.15	17730.21	9612.42	312.09	59467.88
		2012	102682.47	28490.88	274298.34	9157.37	414629.06			2012	430125.78	160464.48	194761.58	19190.21	804542.04
		2017	11885.34	44207.74	21739.55	1336.64	79169.27			2017	123518.62	9475.19	96022.26	784.88	229800.96
天津	数字产业化	2007	326.58	1755.29	3470.42	148.87	5701.17	湖南	数字产业化	2007	1434.95	301.42	169630.42	57.07	171423.86
		2012	2898.15	682.65	248.63	57.50	3886.93			2012	30.58	72.94	7238.70	0.76	7342.99
		2017	11.15	2408.26	526.70	71.70	3017.81			2017	370.44	331.24	54529.42	602.90	55834.00
	产业数字化	2007	1836.68	16476.66	15439.22	158.32	33910.88	湖北	数字产业化	2007	1526.68	7421.94	26690.56	94.07	35733.26
		2012	621061.43	154271.84	436790.08	4288.14	1216411.48			2012	2285.52	11178.24	622100.61	2008.20	637572.56
		2017	2284.38	67770.18	145083.66	1386.93	216525.15			2017	8982.18	162127.38	106574.64	39802.32	317486.52
河北	数字产业化	2007	1607.87	732.74	1439.34	45.07	3825.02	湖南	数字产业化	2007	28047.18	1727.30	2764.31	62.69	32601.47
		2012	1263.90	551.50	3573.18	1093.69	6482.27			2012	2693.57	47.84	1120.76	270.41	4132.58
		2017	349.66	166.16	1254.40	15.26	1785.48			2017	587.12	66.77	3429.04	846.93	4929.86
	产业数字化	2007	10712.52	13732.50	10604.66	188.28	35237.96	广东	数字产业化	2007	27777.02	3021.81	5991.38	3330.27	40120.48
		2012	170118.55	131562.47	568664.58	10059.12	880404.72			2012	211449.10	98414.11	248268.76	10319.12	568451.09
		2017	22963.88	43990.08	26915.88	304.73	94174.57			2017	7206.78	3281.76	31797.41	513.12	42799.07
山西	数字产业化	2007	41794.06	1867.72	7056.40	153.48	50871.66	广东	数字产业化	2007	0.00	7544.16	5892.15	295.27	13731.58
		2012	724239.50	142061.64	151885.18	816.41	1019002.74			2012	0.00	897.14	22259.20	14793.71	37950.06
		2017	1074507.32	149133.29	9061.66	695.59	1233397.85			2017	4.14	2848.07	6140.26	770.20	9762.68
	产业数字化	2007	131260.79	52293.44	37210.46	691.62	221456.31	广东	数字产业化	2007	0.00	10978.04	19433.75	585.66	30997.45
		2012	2657476.66	297381.92	307440.44	3663.95	3265962.97			2012	0.00	330118.75	147838.84	54621.92	532579.51
		2017	5586308.88	284936.66	336320.38	9051.35	6216617.27			2017	10.38	72201.14	80710.78	50460.56	203382.86

续表 4.2 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济碳排放量

省份	部门	年份	煤炭(吨)	石油(吨)	电力(吨)	天然气(吨)	合计(吨)	省份	部门	年份	煤炭(吨)	石油(吨)	电力(吨)	天然气(吨)	合计(吨)
内蒙古	数字	2007	1277.28	89.68	142.21	2.75	1511.92	广西	数字	2007	104.23	1.42	440.52	13.13	559.30
	产业	2012	1366.62	72.58	13918.08	7.51	15364.79		产业	2012	896.11	98.54	2710.31	155.94	3860.90
	化	2017	150.28	92.80	162.71	12.39	418.18		化	2017	490.46	9554.50	8980.01	434.55	19459.52
	产业	2007	24608.56	3688.19	2957.09	1001.34	32255.18		产业	2007	827.58	81.99	7594.45	5.80	8509.82
	数字	2012	407658.76	14768.48	289861.37	567.61	712856.22		数字	2012	13606.56	80774.52	129964.32	1043.81	225389.21
	化	2017	1073636.42	44374.97	210574.42	16983.07	1345568.87		化	2017	12520.17	91244.38	277145.20	3263.72	384173.47
辽宁	数字	2007	2383.41	3450.27	726.35	143.99	6704.02	海南	数字	2007	0.00	5608.27	308.18	20.64	5937.10
	产业	2012	69734.28	2222.22	36121.14	2365.38	110443.02		产业	2012	0.00	741.05	86150.52	111.24	87002.81
	化	2017	3.80	70.92	274.24	2.49	351.44		化	2017	0.00	11.44	172.37	8.36	192.17
	产业	2007	16886.78	54254.09	27163.34	517.42	98821.63		产业	2007	0.00	3829.90	1098.78	37.83	4966.51
	数字	2012	302932.08	480639.80	495275.58	11893.19	1290740.65		数字	2012	0.00	135863.62	72294.40	1276.70	209434.72
	化	2017	3048.11	33757.83	70092.23	585.95	107484.13		化	2017	0.00	190878.80	82072.16	661.53	273612.49
吉林	数字	2007	418.30	215.66	107.37	42.31	783.64	重庆	数字	2007	1018.09	22.59	264.77	204.64	1510.09
	产业	2012	2102.67	186.57	839.73	8.02	3136.98		产业	2012	7695.24	2941.51	1492.92	235.91	12365.58
	化	2017	388.63	129.95	289.32	21.71	829.61		化	2017	1379.80	1927.05	19058.23	24616.33	46981.41
	产业	2007	5535.61	4259.60	1896.58	130.38	11822.17		产业	2007	7609.16	467.66	5626.01	305.09	14007.93
	数字	2012	213998.66	94548.35	35064.37	1652.70	345264.08		数字	2012	14786.86	5679.29	10685.27	542.58	31694.00
	化	2017	546188.40	19820.66	14009.00	4109.70	584127.75		化	2017	439516.58	119985.37	327655.73	81991.73	969149.41
黑龙江	数字	2007	34313.21	7695.85	30545.49	452.28	73006.83	四川	数字	2007	29195.27	11314.97	3417.78	83.83	44011.85
	产业	2012	1173430.42	3378.46	14250.33	8.93	1191068.14		产业	2012	244954.86	35106.30	38716.24	1070.36	319847.77
	化	2017	2467.46	1120.33	1222.21	128.11	4938.11		化	2017	4279.45	546.16	24888.30	521.06	30234.97
	产业	2007	21174.89	5805.94	8736.27	64.62	35781.72		产业	2007	60474.78	16362.79	25052.23	917.02	102806.83
	数字	2012	157334.92	80743.78	137131.28	10261.86	385471.85		数字	2012	1071493.50	90166.31	303870.42	11675.60	1477205.82
	化	2017	118748.32	185139.17	213328.86	6235.63	523451.98		化	2017	147085.28	24296.67	96501.38	3856.41	271739.74
上海	数字	2007	0.00	1532990.54	682045.06	67234.83	2282270.43	贵州	数字	2007	3961.81	40.09	476.77	4.86	4483.53
	产业	2012	0.00	416.45	233581.80	397.81	234396.06		产业	2012	50426.32	32.16	4280.72	15.53	54754.74
	化	2017	0.00	23.47	213.22	10.67	247.36		化	2017	52548.78	24.12	6822.15	67.26	59462.31
	产业	2007	0.00	28712.29	10652.76	306.11	39671.16		产业	2007	22707.08	6223.65	12283.56	124.27	41338.56
	数字	2012	0.00	17234.51	32289.42	1899.28	51423.22		数字	2012	136085.74	17009.10	110893.68	1480.61	265469.14
	化	2017	0.00	4295.83	2124.46	808.48	7228.78		化	2017	299686.64	26056.03	372376.36	13525.25	711644.28
江苏	数字	2007	5354.28	16268.51	60184.02	297.77	82104.57	云南	数字	2007	722.27	1777.63	31987.30	58.14	34545.34
	产业	2012	696.27	172.80	39446.83	661.45	40977.35		产业	2012	13555.27	703.80	10059.76	46.48	24365.32
	化	2017	118.26	27.88	137.26	144.04	427.44		化	2017	28434.32	210.69	4137.23	33.36	32815.60
	产业	2007	13074.39	13448.99	86783.52	694.66	114001.56		产业	2007	12101.05	1486.91	18725.46	105.42	32418.84
	数字	2012	78094.85	8362.08	874564.08	7849.63	968870.63		数字	2012	278688.06	27317.20	369706.58	1456.61	677168.44
	化	2017	12550.25	9943.62	62902.19	731.02	86127.08		化	2017	373257.14	201779.08	807290.90	3162.55	1385489.66
浙江	数字	2007	15.84	2984.45	15436.94	123.47	18560.70	陕西	数字	2007	1662.46	1535.00	282.91	26.46	3506.83
	产业	2012	63520.50	745.40	163206.39	254.70	227727.00		产业	2012	686256.98	704.48	3862.02	78.59	690902.08
	化	2017	7341.64	134.07	15065.37	154.43	22695.50		化	2017	20090.18	360.63	2410.62	301.61	23163.03
	产业	2007	217.56	13645.36	25707.46	363.91	39934.30		产业	2007	15758.43	4502.08	2565.92	54.48	22880.91
	数字	2012	500.94	155807.17	255528.75	9479.51	421316.38		数字	2012	589459.96	72912.20	68615.29	1847.22	732834.66
	化	2017	36.25	153964.33	26855.67	1769.33	182625.57		化	2017	424938.04	88500.91	289059.66	4987.91	807486.53

续表 4.2 2007、2012、2017 年 30 个省份数字经济碳排放量

省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (吨)	电力 (吨)	天然气 (吨)	合计 (吨)	省份	部门	年份	煤炭 (吨)	石油 (吨)	电力 (吨)	天然气 (吨)	合计 (吨)
安徽	数字	2007	1217.11	43.51	4745.04	10.53	6016.19	甘肃	数字	2007	683.10	1052.53	533.30	7.57	2276.50
	产业	2012	415.23	24.31	774.45	5.38	1219.37		产业	2012	6375.08	139.81	2803.87	566.71	9885.47
	化	2017	80.03	7.98	402.38	19.68	510.07		化	2017	189.48	200.59	558.94	1.86	950.88
	产业	2007	14580.56	11190.40	20503.33	1400.85	47675.14		产业	2007	3183.52	5370.50	2565.15	23.27	11142.45
	数字	2012	297525.51	73202.39	163023.25	902.86	534654.01		数字	2012	58017.46	93012.31	34332.19	2231.56	187593.53
	化	2017	26981.94	5302.84	121218.38	976.55	154479.71		化	2017	187513.34	133036.60	188260.98	582.42	509393.34
福建	数字	2007	10419.08	906.97	14599.14	402.80	26327.99	青海	数字	2007	632383.00	627.03	99.71	0.28	633110.02
	产业	2012	80068.00	370.47	101238.67	116.44	181793.58		产业	2012	115.05	842.99	636.00	1.28	1595.32
	化	2017	334.85	59.52	4593.91	368.67	5356.95		化	2017	2.86	52.44	9.60	6.64	71.55
	产业	2007	8658.35	29640.15	7485.79	29.87	45814.16		产业	2007	581.70	257.98	508.26	0.71	1348.65
	数字	2012	15810.97	91136.54	203219.02	4128.07	314294.61		数字	2012	16428.59	7029.97	48555.45	8.18	72022.20
	化	2017	1558.26	5177.09	46176.67	4267.11	57179.13		化	2017	3010.08	2318.39	101489.23	20.58	106838.27
江西	数字	2007	5157.12	93.66	2095.65	76.14	7422.57	宁夏	数字	2007	5591.11	139.86	1650.93	116.07	7497.98
	产业	2012	146391.07	1029.27	78829.33	465.38	226715.06		产业	2012	5628.48	39.72	240.10	13.81	5922.10
	化	2017	301.34	53.45	1230.21	51.00	1636.00		化	2017	394.65	32.31	781.05	123.24	1331.25
	产业	2007	15231.39	1130.79	5298.38	22.25	21682.80		产业	2007	1577.93	199.22	2300.95	19.41	4097.51
	数字	2012	139981.23	38283.17	51583.50	1763.21	231611.10		数字	2012	78423.98	4824.75	22891.86	1244.09	107384.67
	化	2017	157300.83	29977.37	449006.86	7329.88	643614.94		化	2017	126170.37	144689.54	290771.76	27114.82	588746.49
山东	数字	2007	102896.49	53834.49	27135.43	82.64	183949.06	新疆	数字	2007	968.29	967.88	935.04	17.75	2888.96
	产业	2012	352593.53	45686.88	74770.42	377.03	473427.85		产业	2012	2608.19	291.61	579.09	2.33	3481.22
	化	2017	83433.11	253258.94	4457297.24	1470.01	4795459.30		化	2017	898.97	1928.15	13101.87	49.55	15978.54
	产业	2007	305106.23	76741.81	94579.56	405.96	476833.55		产业	2007	5091.63	11568.40	4830.26	55.78	21546.08
	数字	2012	3323383.24	1432482.24	1500970.75	33533.11	6290369.34		数字	2012	97808.49	225085.74	49416.34	1759.08	374069.65
	化	2017	1411671.58	484668.37	944647.00	10574.19	2851561.14		化	2017	91749.12	45096.89	296854.10	3462.39	437162.50

4.2.1 数字产业化部门对各省份能源消耗碳排放量的测算

2007、2012、2017 年数字产业化部门煤炭、石油等化石能源消耗碳排放总量呈持续增长态势的有山西、广西、贵州、云南 4 个省份。电力、天然气等清洁能源消耗碳排放总量呈持续增长态势的有山东、广西、重庆、贵州 4 个省份。从时间维度上，数字产业化部门化石能源消耗碳排放量呈持续降低态势的有河北、上海、江苏、河南、海南、青海、宁夏 7 个省份。除了北京和广东化石能源消耗碳排放量在 2007 至 2012 年间降低，在 2012 至 2017 年间增长外，其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长，在 2012 至 2017 年间降低的态势。数字产业化部门清洁能源消耗碳排放量消耗量呈持续降低态势的有黑龙江、上海、江苏、安徽、云南 5 个省份。除了天津、湖北、湖南、宁夏、新疆 5 个省份清洁能源消耗碳排放量在 2007 至 2012 年间降低，在 2012 至 2017 年间增长外，其他省份均呈现在

2007 至 2012 年间增长，在 2012 至 2017 年间降低的态势。

2017 年山西省数字产业化部门煤炭消耗产生的碳排放量高达 107.45 万吨，远高于其他省份。山东、贵州、云南、陕西煤炭消耗产生的碳排放量分别 83433.11 吨、52548.78 吨、28434.32 吨、20090.18 吨，其他省份数字产业化部门煤炭消耗产生的排放量较少。2017 年山东、山西数字产业化部门石油消耗所排放的二氧化碳量分别为 25.33 万吨和 14.91 万吨，其他省份数字产业化部门石油消耗产生的碳排放量均不足 1 万吨。2017 年山东省数字化产业部门电力消耗产生的碳排放量最高，达到 445.73 万吨。湖北、四川、重庆、浙江数字产业化部门消耗电力所产生的碳排放量分别为 5.45 万吨、2.49 万吨、1.91 万吨、1.51 万吨，其他省份数字产业化部门消耗电力产生的碳排放量皆不足 1 万吨。2017 年重庆数字化产业部门天然气消耗产生的碳排放量在所有省份中位列第一，高达 2.46 万吨，其他省份数字产业化部门消耗天然气产生的碳排放量皆不足 5000 吨。

2017 年数字经济增加值占各省份 GDP 比重较高的省份有北京、广东、上海，其数字产业化部门消耗电力产生的碳排放量分别占数字产业化部门碳排放总量的 57.29%、62.90%、86.20%，数字产业化部门消耗天然气产生的碳排放量分别占数字产业化部门碳排放总量的 12.95%、7.89%、4.31%，消耗电力和天然气产生的碳排放量之和均超过碳排放总量的 70%。在数字经济发展水平较高的东部沿海地区，由于其经济实力雄厚，吸引了众多高技术人才，推动物联网、云计算等产业的发展。这些新兴产业对化石能源的消耗较少，电力等清洁能源消耗产生的碳排放是其碳排放总量的主要构成部分。

4.2.2 产业数字化部门对各省份能源消耗碳排放量的测算

2007、2012、2017 年产业数字化部门煤炭、石油等化石能源消耗碳排放总量呈持续增长态势的有山西、内蒙古、吉林、黑龙江、江西、湖北、广西、海南、重庆、贵州、云南、甘肃、宁夏 13 个省份。电力、天然气等清洁能源消耗碳排放总量呈持续增长态势的有山西、黑龙江、江西、广西、海南、重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 13 个省份。从时间维度上，产业数字化部门化石能源消耗碳排放量呈持续降低态势的仅有上海 1 个省份，其他省份均呈现在 2007 至 2012 年间增长，在 2012 至 2017 年间降低的态势。产业数字化部门清洁能源消耗碳排放量除了持续增长的省份外，其他省份均呈现在 2007 至

2012 年间增长，在 2012 至 2017 年间降低的态势。

2017 年山西产业数字化部门煤炭消耗产生的排放量最多，达 558.63 万吨。排在第二位和第三位的分别是山东和内蒙古，碳排放量分别为 141.17 万吨、107.36 万吨，其他各省份的煤炭消耗产生的排放量均在 100 万吨以下。2017 年山东省产业数字化部门对石油消耗产生的二氧化碳排放量最高，达 48.47 万吨。山西和云南产业数字化部门对石油消耗产生的排放量分别为 28.49 万吨、20.18 万吨，其他各省份均在 20 万吨以下。2017 年产业数字化部门对山东、云南两省的电力消耗产生的二氧化碳排放量影响尤为显著，山东省达到了 94.46 万吨，天津市达到了 80.73 万吨，其他各省份的二氧化碳排放量均在 50 万吨以下。2017 年重庆产业数字化部门天然气消耗产生的排放量最多，高达 8.20 万吨，广东、湖北、宁夏的天然气消耗产生的排放量分别为 5.05 万吨、3.98 万吨、2.71 万吨，其他省份的天然气消耗产生的排放量均不足 2 万吨。

2017 年 30 个省份中有 16 个省份产业数字化部门消耗煤炭和石油合计产生的碳排放量超过碳排放总量的 50%，包括数字经济增加值占各省份 GDP 比重较高的北京、上海、重庆。其中产业数字化部门消耗煤炭和石油合计产生的碳排放量占比最高的是吉林、山西、浙江，分别占产业数字化部门碳排放量的 96.90%、94.44%、84.33%。由于中国北方地区有较多的重工业企业、能源开采企业。一些省份过去的发展重点集中于能源开采以及重工业，近年来人才流失严重，产业转型困难，导致这些省份在数字经济时代进步缓慢。但其工业、能源业仍然在持续发展，由于数字技术的限制，对化石能源的消耗持续增加，化石能源消耗产生的碳排放也随之增加。产业数字化部门碳排放量仍以化石燃料燃烧产生的碳排放为主。

4.2.3 数字产业化部门与产业数字化部门能源消耗碳排放量的对比分析

数字产业化部门化石能源消耗碳排放量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济化石能源消耗碳排放总量的 69.14%、19.72%、10.91%，产业数字化部门化石能源消耗碳排放量分别占比 30.86%、80.28%、89.09%。数字产业化部门清洁能源消耗碳排放量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济清洁能源消耗碳排放总量的 69.01%、13.29%、42.04%，产业数字化部门清洁能源消耗碳排放量分别

占比 30.99%、86.71%、57.96%。数字产业化部门化石能源消耗碳排放量占数字经济化石能源消耗碳排放总量的比重持续下降,产业数字化部门化石能源消耗碳排放量占数字经济化石能源消耗碳排放总量的比重持续上升。数字产业化部门清洁能源消耗碳排放量占数字经济清洁能源消耗碳排放总量的比重在 2007 至 2012 年间大幅下降,在 2012 至 2017 年间占比上升,产业数字化部门清洁能源消耗碳排放量占数字经济清洁能源消耗碳排放总量的比重与之相反。

2007、2012、2017 年各省份数字经济能源消耗产生的碳排放总量分别为 548.70 万吨、2941.42 万吨、2676.75 万吨,各省份数字经济化石能源消耗产生碳排放量分别为 382.38 万吨、1986.31 万吨、1566.20 万吨,分别占碳排放总量的 69.69%、67.53%、58.51%。可以看出,化石能源消耗产生的碳排放是数字经济能源消耗碳排放的主要构成部分,但随着数字经济的发展,化石能源消耗产生的碳排放量在数字经济能源消耗碳排放总量中的占比呈下降趋势。

2007、2012、2017 年各省份数字产业化部门化石能源消耗产生碳排放量分别为 264.37 万吨、391.71 万吨、170.94 万吨,清洁能源消耗产生碳排放量分别为 114.78 万吨、126.94 万吨、466.93 万吨,数字产业化部门清洁能源消耗产生碳排放量分别占数字产业化部门能源消耗碳排放总量的 30.27%、24.48%、73.20%。2007、2012、2017 年各省份产业数字化部门化石能源消耗产生碳排放量分别为 118.01 万吨、1594.60 万吨、1395.26 万吨,产业数字化部门清洁能源消耗产生碳排放量分别为 51.53 万吨、828.17 万吨、643.62 万吨,产业数字化部门化石能源消耗产生碳排放量分别占产业数字化部门能源消耗碳排放总量的 69.60%、65.82%、68.43%。数字产业化部门清洁能源消耗碳排放量占数字产业化部门能源消耗碳排放总量的比重整体呈上升趋势,产业数字化部门化石能源消耗碳排放量占产业数字化部门能源消耗碳排放总量的比重较高且占比稳定。2017 年,上海、海南、福建、浙江、江苏、山东、广东等省份数字产业化部门化石能源消耗产生碳排放量占化石能源消耗碳排放总量的比重较低,山西、内蒙古、吉林、河北、山东、陕西、甘肃等省份产业数字化部门化石能源消耗产生碳排放量占比较高。可见,在数字经济发展水平较高的东部沿海地区,数字产业化部门能源消耗多以清洁能源为主。而山西、山东、陕西、内蒙古等地,作为中国的能源生产大省,产业数字化部门能源消耗多为化石能源。

4.3 本章小结

本章根据 2007、2012、2017 年中国 30 个省份投入产出表的准面板数据分类合并重新编制出中国数字经济投入产出表,分别测算数字产业化部门和产业数字化部门对煤炭、石油、天然气和电力部门的能源消耗量。随后由各省份能源消耗量乘以该类能源的碳排放系数得到对应碳排放量,将数字产业化部门和产业数字化部门煤炭、石油、电力、天然气四类能源的碳排放量相加,得到数字产业化部门和产业数字化部门能源消耗碳排放总量。分别对各省份数字产业化部门和产业数字化部门的能源消耗量和碳排放量展开分析并进行对比。发现在数字经济发展水平较高的东部沿海地区,数字产业化部门能源消耗多以电力、天然气等清洁能源为主。而在数字经济发展水平较低的西部地区以及山西、山东、陕西、内蒙古等中国的能源生产大省,产业数字化部门能源消耗多为化石能源。

5 数字经济碳排放效应的因素分解

本章将数字经济碳排放效应从不同层面细分为四个影响因素,通过对数平均迪氏指数分解法(LMDI)进行定量分析,探讨能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应对数字经济部门碳排放的影响程度。

5.1 LMDI 分解模型构建

5.1.1 对数平均迪氏指数分解法(LMDI)的基本模型

对数平均迪氏指数分解法(LMDI)的基本原理是将目标变量 V 分解为 n 个独立影响因素的叠加效应,其中 i 代表不同的部门、区域或能源类型,基本数学表达式如下:

$$V = \sum_i V_i = \sum_i X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni} \quad (5.1)$$

在时间序列从起始点 0 至终止点 T 期间,目标变量经历从 V^0 到 V^T 的演变过程,两个时间节点的数学表达式为:

$$V^0 = \sum_i X_{1i}^0, X_{2i}^0, \dots, X_{ni}^0 \quad (5.2)$$

$$V^T = \sum_i X_{1i}^T, X_{2i}^T, \dots, X_{ni}^T \quad (5.3)$$

一般采用加法和乘法两种方式来分析,表达式分别为:

$$\Delta V = V^T - V^0 = \Delta V_{X_1} + \Delta V_{X_2} + \dots + \Delta V_{X_n} + \Delta V_{Xrsd} \quad (5.4)$$

$$D = \frac{V^T}{V^0} = D_{X_1} \times D_{X_2} \times \dots \times D_{X_n} \times RD \quad (5.5)$$

其中, $\Delta V_{X_1}, \Delta V_{X_2}, \dots, \Delta V_{X_n}$ 表示各因素的变化对总量 V 变化的贡献值;
 $D_{X_1}, D_{X_2}, \dots, D_{X_n}$ 表示各因素的变化对总量 V 变化的贡献率; ΔV_{Xrsd} 和 RD 代表残差部分对总量变化的影响。

依据 Ang^[29]提出的对数平均迪氏指数(LMDI)分解方法,能够有效地消除分解过程中的乘积剩余问题,降低了参数估计中的主观判断与不确定性。通过加法分解和乘法分解,可以得到第 K 个因子分别为:

$$\Delta V_{X_k} = \sum_i L(V_i^T, V_i^0) \ln \left\{ \frac{X_{ki}^T}{X_{ki}^0} \right\} \quad (5.6)$$

$$D_{X_k} = \exp \left\{ \sum_i \frac{L(V_i^T, V_i^0)}{L(V^T, V^0)} \ln \left\{ \frac{X_{ki}^T}{X_{ki}^0} \right\} \right\} \quad (5.7)$$

5.1.2 Kaya 公式

日本学者 Kaya 在 IPCC 会议中引入了一个简明的结构分析模型，即著名的 Kaya 公式。该模型将政策、经济活动、人口等诸多因素与碳排放紧密结合起来，用以量化人口规模、经济发展水平、能源消耗总量等因素对碳排放量的具体影响。其数学表达式为：

$$C = \frac{C}{E} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P \quad (5.8)$$

在这个方程中， C 表示碳排放总量； E 表示总能源消耗量； Y 表示 GDP； P 表示总人口数。

5.1.3 数字经济碳排放效应的 LMDI 分解模型

采用对数平均迪氏指数分解方法（LMDI）对中国各省份的数字经济碳排放效应进行分解，由公式（5.8）可以得出：

$$C = \sum_{i=1} C_i = \sum_{i=1} \frac{C_i}{E} \times \frac{E}{DE} \times \frac{DE}{P} \times P = \sum_{i=1} S \times I \times D \times P \quad (5.9)$$

式中， C 表示数字经济碳排放量， C_i 表示数字经济部门 i 类能源的碳排放量， E 表示数字经济部门能源消费总量， DE 表示数字经济增加值， P 表示人口总数。 $S = C_i / E$ 表示能源结构参数，即碳排放总量相对于能源消费总量的比例； $I = E / DE$ 表示能源利用效率，即每单位数字经济增加值所消耗的能源量； $S = C_i / E$ 则表示人均数字经济增加值。

可以将数字经济领域的能源消费碳排放效应拆解为四大影响因素，即能源结构强度效应（ ΔS ）、能源消费效率效应（ ΔI ）、数字经济增长效应（ ΔD ）以及人口规模效应（ ΔP ）。依据完全分解模型，通过加法分解和乘法分解两种计算方式，将 t 期的碳排放量记为 C^t ，基准期的碳排放量记为 C^0 ，两期之间的碳排放量变化量用 ΔC 表示，从基期到 t 期的碳排放变化总量的数学表达式为：

$$\begin{aligned} \Delta C = C^t - C^0 &= \sum_{i=1} S^t \times I^t \times D^t \times P^t - \sum_{i=1} S^0 \times I^0 \times D^0 \times P^0 \\ &= \Delta S + \Delta I + \Delta D + \Delta P \end{aligned} \quad (5.10)$$

各因素的贡献值可以表示为：

$$\Delta S = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \times \ln \left\{ \frac{S_i^t}{S_i^0} \right\} \quad (5.11)$$

$$\Delta I = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \times \ln \left\{ \frac{I_i^t}{I_i^0} \right\} \quad (5.12)$$

$$\Delta D = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \times \ln \left\{ \frac{D_i^t}{D_i^0} \right\} \quad (5.13)$$

$$\Delta P = \sum_i \frac{C_i^t - C_i^0}{\ln C_i^t - \ln C_i^0} \times \ln \left\{ \frac{P_i^t}{P_i^0} \right\} \quad (5.14)$$

根据上述计算结果并可以得到各因素的贡献率：

$$\gamma_S = \frac{\Delta S}{\Delta C} \times 100\% \quad (5.15)$$

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{\Delta C} \times 100\% \quad (5.16)$$

$$\gamma_D = \frac{\Delta D}{\Delta C} \times 100\% \quad (5.17)$$

$$\gamma_P = \frac{\Delta P}{\Delta C} \times 100\% \quad (5.18)$$

式中， γ_S 、 γ_I 、 γ_D 、 γ_P 分别表示能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应对碳排放量变化的贡献率。

数字经济碳排放量数据使用第四章的计算结果，将各省份的碳排放量数据累加，即得出全国层面的数据。数字经济能源消耗量数据由第四章测算出的能源消耗量乘以对应能源的标准煤折算系数，得到各省份以标准煤为单位的能源消耗总量。标准煤折算系数数据来源于《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2020)。数字经济增加值数据由新编制的数字经济产业投入产出表整理得出。人口数据来源于对应年份的中国统计年鉴。

5.2 全国层面数字经济碳排放效应的 LMDI 分解分析

借助对数平均迪氏指数分解法对 2007 年、2012 年、2017 年中国数字经济碳排放量进行无残差分解。根据分解结果，可以将数字经济能源消费碳排放变化分解为能源结构强度效应 (ΔS)、能源消费效率效应 (ΔI)、数字经济增长效应 (ΔD) 以及人口规模效应 (ΔP)。分解借助于公式 (5.9) — (5.14)，结果如表 5.1 所示。

表 5.1 全国层面数字经济碳排放效应 LMDI 分解结果

	碳排放变化 量（万吨）	能源结构强度 效应（万吨）	能源消费效率 效应（万吨）	数字经济增长 效应（万吨）	人口规模效 应（万吨）
2007-2012	2392.73	228.65	651.72	1455.72	56.63
2012-2017	-264.67	189.86	-1332.61	795.31	82.76
总效应	2128.05	418.51	-680.89	2251.03	139.39
平均效应	1064.03	209.26	-340.44	1125.52	69.70

根据计算结果显示，中国在 2007 年至 2017 年间的碳排放总量呈上升趋势，经分解后的各项效应表明，能源结构强度效应、数字经济增长效应以及人口规模效应对碳排放起促进作用，能源消费效率效应在 2012 年至 2017 年对碳排放起抑制作用。为了深入探究各项效应对碳排放变化的具体贡献，运用公式（5.15）—（5.18）逐一计算各因素贡献率，相关结果汇总在表 5.2 中。

表 5.2 全国层面数字经济碳排放 LMDI 分解各效应贡献率

	能源结构强度效应	能源消费效率效应	数字经济增长效应	人口规模效应
2007-2012	9.56%	27.24%	60.84%	2.37%
2012-2017	-71.73%	503.49%	-300.49%	-31.27%

根据中国数字经济碳排放量 LMDI 分析结果及各效应贡献率分析得知，能源消费效率效应对抑制数字经济碳排放总量增长起关键作用，数字经济产值的快速增长是导致碳排放量增加的主要动因。能源结构强度效应同样是导致碳排放量增长不可忽视的因素，人口规模的扩大也对碳排放量的增长有所助推。反映出在数字经济部门中，能源消费结构的调整仍有较大改进空间，化石能源燃烧产生的碳排放依然是数字经济部门碳排放的主要来源。

（1）能源结构强度效应

计算结果表明，2007 年至 2017 年间，能源结构强度效应的贡献值及其累计值均表现为正向效应，这意味着它在某种程度上确实促成了碳排放量的增加。其贡献率分别占到了 9.56% 和 -71.73%，绝对值呈上升态势。与 2012 年相比，2017 年数字经济碳排放量降低，对数字经济碳排放量呈现为正向影响的能源结构强度效应在 2007 年至 2017 年间贡献率表现为负。

（2）能源消费效率效应

能源消费效率效应对降低碳排放量产生了最为显著的积极影响,是遏制碳排放增长的关键因素。在 2007 至 2012 年间能源消费效率效应为正值,为 651.72 万吨,在 2012 至 2017 年间为负值,为-1332.61 万吨,2007 至 2017 年间总效应为-680.89 万吨。在 2007 至 2012 年间,其贡献率为 27.24%,对碳排放增长起促进作用。在 2012 至 2017 年间,由于碳排放总量降低,对数字经济碳排放量呈现为负向影响的能源消费效率效应在 2007 年至 2017 年间贡献率表现为正,其贡献率为 503.49%,是数字经济部门碳排放总量降低的最主要因素。

(3) 数字经济增长效应

数字经济增长效应是推动碳排放量增长的关键驱动因素。在 2007 年至 2017 年间,数字经济增长效应的总贡献达到了 2251.03 万吨,显然,数字经济的迅猛发展引发了能源消耗的大幅攀升,从而导致碳排放总量急剧增加。尽管数字经济增长对碳排放总量的贡献显著,这一增长趋势在后期仍有所放缓,从 2007 年至 2012 年的 1455.72 万吨下降到了 2012 年至 2017 年的 795.31 万吨。

(4) 人口规模效应

人口规模效应对碳排放的影响体现在多个方面。更多的人口意味着更大的住房、交通、食品和其他消费品需求,这些需求的满足都需要消耗能源,从而产生更多的碳排放;人口增长会刺激工业化和城市化进程加速,工业生产规模扩大,能源消耗总量增加,进一步加大碳排放;农业生产规模也会随着人口增长而扩大,化肥、农药使用增加,以及农田开垦可能导致的植被破坏,均可能间接增加碳排放。人口规模效应对碳排放的影响是多维度的,不仅直接影响能源消耗,还通过改变生产和生活方式间接影响碳排放水平。在 2015 年以前,得益于中国的计划生育政策,人口增速得到了有效控制,人口规模效应在碳排放增长方面的贡献相对有限。

5.3 省域层面数字经济碳排放效应的 LMDI 分解分析

对各省份按照能源结构强度效应(ΔS)、能源消费效率效应(ΔI)、数字经济增长效应(ΔD)以及人口规模效应(ΔP)进行 LMDI 分解,分解结果和贡献率如表 5.3 所示。

表 5.3 省域层面数字经济碳排放效应 LMDI 分解结果

	年份	碳排放 变化量	能源结构强度效应		能源消费效率效应		数字经济增长效应		人口规模效应	
			效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)
全国	2007-2012	2392.73	228.65	9.56	651.72	27.24	1455.72	60.84	56.63	2.37
	2012-2017	-264.67	189.86	-71.73	-1332.61	503.49	795.31	-300.49	82.76	-31.27
北京	2007-2012	49.51	5.04	10.18	33.96	68.59	7.31	14.76	3.20	6.47
	2012-2017	-43.38	-13.00	29.96	-40.02	92.27	8.38	-19.31	1.27	-2.92
天津	2007-2012	118.07	5.98	5.07	81.76	69.24	23.03	19.51	7.29	6.18
	2012-2017	-100.08	0.44	-0.44	-111.62	111.54	9.76	-9.75	1.34	-1.34
河北	2007-2012	84.78	8.44	9.96	45.87	54.10	29.25	34.50	1.22	1.44
	2012-2017	-79.09	-13.06	16.52	-70.24	88.81	3.50	-4.42	0.71	-0.90
山西	2007-2012	401.26	5.87	1.46	189.80	47.30	199.09	49.62	6.50	1.62
	2012-2017	316.50	0.88	0.28	-115.77	-36.58	437.56	138.25	-6.16	-1.95
内蒙 古	2007-2012	69.45	5.92	8.52	29.86	43.00	33.34	48.02	0.32	0.47
	2012-2017	61.78	-16.11	-26.07	57.04	92.33	22.12	35.80	-1.27	-2.06
辽宁	2007-2012	129.57	8.01	6.19	64.82	50.03	55.84	43.10	0.89	0.69
	2012-2017	-129.33	7.77	-6.01	-124.18	96.01	-12.19	9.43	-0.73	0.57
吉林	2007-2012	33.58	0.35	1.06	22.60	67.29	10.75	32.01	-0.12	-0.36
	2012-2017	23.66	5.16	21.81	-9.63	-40.71	31.13	131.62	-3.01	-12.71
黑龙 江	2007-2012	146.78	-4.38	-2.99	87.68	59.74	64.93	44.24	-1.45	-0.99
	2012-2017	-104.81	-6.10	5.82	-148.33	141.52	58.38	-55.69	-8.76	8.35
上海	2007-2012	-203.61	75.55	-37.11	-354.27	173.99	60.49	-29.71	14.62	-7.18
	2012-2017	-27.83	-6.06	21.78	-24.12	86.64	2.13	-7.66	0.21	-0.76
江苏	2007-2012	81.37	12.11	14.89	16.32	20.06	50.45	62.00	2.49	3.06
	2012-2017	-92.33	-8.72	9.45	-89.44	96.87	4.45	-4.82	1.38	-1.49
浙江	2007-2012	59.05	-0.15	-0.26	33.19	56.20	23.62	39.99	2.40	4.07
	2012-2017	-44.37	-18.47	41.62	-32.09	72.33	3.03	-6.84	3.16	-7.11
安徽	2007-2012	48.22	0.03	0.07	18.60	38.57	30.07	62.37	-0.49	-1.01
	2012-2017	-38.09	10.92	-28.68	-60.85	159.75	11.43	-30.02	0.40	-1.06
福建	2007-2012	42.39	6.66	15.71	15.13	35.70	19.25	45.40	1.35	3.19
	2012-2017	-43.36	2.17	-5.02	-50.74	117.04	4.03	-9.29	1.19	-2.74
江西	2007-2012	42.92	-0.29	-0.68	25.56	59.54	17.28	40.26	0.38	0.88
	2012-2017	18.69	13.95	74.63	-42.54	-227.56	46.84	250.59	0.44	2.34
山东	2007-2012	610.30	0.86	0.14	269.95	44.23	330.11	54.09	9.38	1.54
	2012-2017	88.32	248.55	281.41	-83.37	-94.39	-100.55	-113.85	23.70	26.83
河南	2007-2012	75.86	1.65	2.18	15.72	20.73	57.75	76.13	0.73	0.96
	2012-2017	-65.75	9.48	-14.43	-80.15	121.91	3.41	-5.18	1.51	-2.30
湖北	2007-2012	43.78	1.59	3.62	-9.66	-22.06	51.30	117.18	0.55	1.26
	2012-2017	-27.16	-38.32	141.10	-1.75	6.43	11.86	-43.68	1.05	-3.85
湖南	2007-2012	49.99	2.60	5.20	14.55	29.10	31.96	63.94	0.88	1.76
	2012-2017	-52.49	5.00	-9.52	-59.50	113.36	1.88	-3.58	0.14	-0.26

续表 5.3 省域层面数字经济碳排放效应 LMDI 分解结果

	年份	碳排放 变化量	能源结构强度效应		能源消费效率效应		数字经济增长效应		人口规模效应	
			效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)	效应值 (万吨)	贡献率 (%)
广东	2007-2012	52.58	-6.05	-11.50	41.05	78.06	14.82	28.19	2.76	5.25
	2012-2017	-35.74	1.81	-5.05	-50.57	141.50	9.58	-26.80	3.45	-9.65
广西	2007-2012	22.02	-3.34	-15.16	17.97	81.63	7.49	34.01	-0.11	-0.48
	2012-2017	17.44	4.23	24.27	-5.65	-32.42	17.49	100.30	1.37	7.84
海南	2007-2012	28.55	3.10	10.87	14.23	49.83	10.58	37.06	0.64	2.24
	2012-2017	-2.26	-6.32	279.19	-17.55	775.46	19.73	-871.66	1.88	-82.99
重庆	2007-2012	2.85	-0.41	-14.21	-1.16	-40.74	4.27	149.69	0.15	5.26
	2012-2017	97.21	-0.59	-0.61	68.10	70.06	27.98	28.79	1.71	1.76
四川	2007-2012	165.02	5.15	3.12	68.23	41.35	91.98	55.74	-0.34	-0.21
	2012-2017	-149.51	7.30	-4.88	-188.73	126.23	29.84	-19.96	2.09	-1.40
贵州	2007-2012	27.44	1.41	5.14	9.93	36.19	16.28	59.32	-0.18	-0.64
	2012-2017	45.09	3.59	7.97	-9.66	-21.42	48.15	106.79	3.00	6.65
云南	2007-2012	63.46	-3.45	-5.44	35.80	56.41	30.42	47.94	0.69	1.09
	2012-2017	71.68	-6.98	-9.74	-14.18	-19.79	91.49	127.64	1.35	1.89
陕西	2007-2012	139.73	3.16	2.26	97.66	69.89	38.18	27.32	0.74	0.53
	2012-2017	-59.31	10.89	-18.37	-160.16	270.04	86.61	-146.03	3.35	-5.65
甘肃	2007-2012	18.41	-0.16	-0.87	11.02	59.85	7.55	40.99	0.01	0.03
	2012-2017	31.29	7.09	22.67	8.88	28.38	15.68	50.12	-0.36	-1.17
青海	2007-2012	-56.08	7.03	-12.54	-96.25	171.61	32.25	-57.50	0.88	-1.57
	2012-2017	3.33	2.51	75.40	-5.03	-151.13	5.62	168.78	0.23	6.95
宁夏	2007-2012	10.17	-0.35	-3.46	4.93	48.51	5.24	51.56	0.34	3.38
	2012-2017	47.68	-1.30	-2.72	36.80	77.19	10.23	21.45	1.95	4.08
新疆	2007-2012	35.31	-1.06	-3.01	22.91	64.88	12.53	35.47	0.94	2.66
	2012-2017	7.56	23.59	312.02	-40.18	-531.50	20.17	266.88	3.98	52.60

从各省的具体分析结果看, 2007年至2012年期间, 所有省份的数字经济碳排放效应均为正值。2012年至2017年期间, 数字经济碳排放效应的四类影响因素中, 能源消费效率效应在多数省份表现为负向影响, 是抑制各省份碳排放量增长的关键驱动力。其余三种效应在这一时段内均推动碳排放量的上升。在省级层面, 四类影响因素的发展演变与全国整体趋势存在差异, 地域差异性更加鲜明地突显了各因素对碳排放的具体影响程度。

(1) 能源结构强度效应

能源结构是指构成能源总消费量的各种能源类型及其相应占比。从碳排放的角度讲, 煤炭和石油等传统的化石能源的碳排放系数相对较高, 而电力、天然气

等清洁能源则具有相对较低的碳排放系数。2007年中国数字经济部门能源消费碳排放总量为548.70万吨,2012年中国数字经济部门能源消费碳排放总量增长至2941.42万吨,2017年中国数字经济部门能源消费碳排放总量又降低到2676.75万吨。2007至2017年间中国数字经济部门能源消费碳排放总量增长了2128.05万吨。

2007年至2017年期间,能源结构强度效应,即数字经济部门碳排放总量与该部门能源消耗总量的比率,总体上对中国数字经济部门的碳排放增长起到了推动作用。2007至2012年间的促进作用更强,能源结构强度效应对碳排放增长的贡献值达到了228.65万吨。黑龙江、浙江、江西、广东、广西、重庆、云南、甘肃、宁夏、新疆这十个省份显示能源结构强度效应为负值,意味着这些省份的数字经济部门碳排放受到了抑制。除此之外的其他省份,能源结构强度效应均为正值,对各自数字经济部门的碳排放增长起到了推动作用。能源结构强度效应贡献值较高的省份有上海、江苏、河北,其能源结构强度效应贡献值分别为75.55、12.11、8.44万吨。2012至2017年间,能源结构强度效应对碳排放增长的贡献值达到了189.86万吨。除北京、河北、内蒙古、黑龙江、上海、江苏、浙江、湖北、海南、重庆、云南、宁夏12个省份能源结构强度效应为负,对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用,其他省份能源结构强度效应均为正效应,对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。观察各省份能源结构强度效应的贡献率,可以发现其对数字经济部门碳排放增长的影响并不稳定且存在一定波动。揭示了各省份虽在不断尝试调整能源结构,但在短期内化石能源仍在能源消费中占据较大份额。

(2) 能源消费效率效应

能源消费效率效应即数字经济部门能源消费总量与数字经济增加值的比值。2007年中国数字经济部门能源消费总量为166.02万吨标准煤,2012年中国数字经济部门能源消费总量增长至758.04万吨标准煤,2017年中国数字经济部门能源消费总量又降低至644.72万吨标准煤。2007年至2017年间中国数字经济领域的能源消费总量历经先增后减的过程,但整体表现为上升态势。

根据各省份数字经济碳排放效应分解结果,发现能源消费效率效应在2007至2012年间对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用;在2012至2017年

间对数字经济部门碳排放量起到抑制作用，并且抑制作用明显。2007至2012年间，能源消费效率效应对碳排放增长的贡献值达到了651.72万吨。除上海、湖北、重庆、青海4个省份能源消费效率效应为负，数字经济部门碳排放量呈现抑制作用外，其他省份能源消费效率效应均为正效应，对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。能源消费效率效应贡献值较高的省份有山东、山西、陕西，其能源消费效率效应贡献值分别为269.95、189.80、97.66万吨。2012至2017年间，能源消费效率效应对数字经济部门碳排放量起到抑制作用，贡献值达到了-1332.61万吨。除内蒙古、重庆、甘肃、宁夏4个省份能源消费效率效应为正，其他省份能源消费效率效应均为负效应，对数字经济部门碳排放量增长呈现出抑制作用。从能源消费效率效应对碳排放量的影响来看，绝大多数省份的能源消费效率效应从2007-2012年间对碳排放增长促进作用转化为2012至2017年间对数字经济部门碳排放量的抑制作用。各省份通过提高数字技术、对能源消费结构进行合理调整、提高能源利用效率等一系列措施，促进碳减排。各省应制定相应的引导政策，使能源消费效率效应对各省份数字经济碳排放的抑制作用更加稳定。

（3）数字经济增长效应

数字经济增长效应即数字经济增加值与人口的比值。2007年中国数字经济增加值总量为20128.37亿元，2012年中国数字经济增加值总量增长至58173.32亿元，2017年中国数字经济增加值总量持续增加到79538.59亿元。数字经济产业规模的扩大与能源消费量的提升密切相关，这一趋势在很大程度上推动了数字经济部门碳排放量的增加。

根据各省份数字经济碳排放效应分解结果，可以得出数字经济增长效应是导致数字经济部门碳排放增长的决定因素。2007至2012年间，数字经济发展迅速，数字经济增长效应对碳排放增长的贡献值达到了1455.72万吨。所有省份数字经济增长效应均为正效应，对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。数字经济增长效应贡献值较高的省份有山东、山西、四川，其能源结构强度效应贡献值分别为330.11、199.09、91.98万吨。2012至2017年间，数字经济增长效应对碳排放增长的贡献值达到了795.31万吨。除辽宁和山东数字经济增长效应为负，其他省份数字经济增长效应为正效应，对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。2012至2017年间数字经济增长效应整体仍为正效应，但其贡献值相较于于

2007 至 2012 年阶段已经开始下降, 并且出现个别省份数字经济增长效应转化为负效应, 表明各省份在追求数字经济快速发展的同时, 也开始重视提升数字经济发展质量。各地在推动数字经济发展的过程中, 必须兼顾数字经济发展质量, 坚持绿色低碳发展理念, 以期有效降低数字经济部门的碳排放水平。

(4) 人口规模效应

人口规模效应即人口总量。2007 年中国人口总量为 130104.63 万人, 2012 年中国人口总量增长至 135379.28 万人, 相较于 2007 年增长 5274.65 万人, 增长率为 4.05%。2017 年中国人口总量持续增长至 139430.29 万人相较于 2012 年增长 4051.01 万人, 增长率为 2.99%。人口增长主要通过需求增加, 进而提高能源消费, 对碳排放产生影响。

根据各省份数字经济碳排放效应分解结果, 2007 至 2017 年间人口规模效应对中国数字经济部门碳排放量增长总体上呈现出促进作用。2007 至 2012 年间, 人口规模效应对碳排放增长的贡献值达到了 56.63 万吨。除吉林、黑龙江、安徽、广西、四川、贵州 6 个省份人口规模效应为负, 数字经济部门碳排放量呈现抑制作用外, 其他省份人口规模效应均为正效应, 对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。2012 至 2017 年间, 人口规模效应对碳排放增长的贡献值达到了 82.76 万吨。除山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、甘肃 12 个省份人口规模效应为负, 其他省份人口规模效应均为正效应, 对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。总的来说, 人口规模效应对数字经济部门碳排放增长的促进作用是比较小的, 抑制碳排放的增长应该降低能源结构强度效应和数字经济增长效应。

5.4 本章小结

本章首先对平均迪氏指数分解法的基本模型和 Kaya 公式进行介绍, 结合以往学者的研究成果, 选取 LMDI 分解法作为本章研究的主要模型方法, 构建新的数字经济碳排放效应 LMDI 分解模型, 对全国层面及省域层面下数字经济部门碳排放影响因素进行分解, 从能源结构强度效应 (ΔS)、能源消费效率效应 (ΔI)、数字经济增长效应 (ΔD) 以及人口规模效应 (ΔP) 四个方面对数字经济部门碳排放效应进行定量分析。

6 结论及对策建议

6.1 结论

本文以数字产业化和产业数字化分类为基础,结合 2007、2012 和 2017 年中国 30 个省份投入产出表准面板数据,编制中国数字经济投入产出表,测算数字产业化部门和产业数字化部门对煤炭、石油、天然气和电力部门的能源消耗量,由各省份能源消耗量乘以该类能源对应的碳排放系数得到各省份数字产业化和产业数字化部门的碳排放量。构建出数字经济碳排放效应的 LMDI 分解模型,从能源结构强度效应、能源消费效率效应、数字经济增长效应以及人口规模效应四个方面对全国层面和省域层面的数字经济碳排放效应进行定量分析。主要研究结论如下:

第一,产业数字化部门能源消耗量在数字经济能源消耗总量中占较大比重。产业数字化部门煤炭消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济煤炭消耗总量的 43.43%、76.46%、89.71%,石油消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济石油消耗总量的 20.08%、94.84%、86.54%,电力消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济电力消耗总量的 31.84%、86.63%、56.95%,天然气消耗量在 2007、2012、2017 年分别占数字经济天然气消耗总量的 14.61%、89.75%、90.47%。产业数字化部门对煤炭和天然气的消耗量占数字经济煤炭和天然气消耗总量的比重持续上升,对石油和电力的消耗量占数字经济石油和电力消耗总量的比重在 2007 至 2012 年间大幅上升,在 2012 至 2017 年间占比下降,但下降幅度远低于 2007 至 2012 年间的增长幅度。可以看出,2012 年后产业数字化部门的能源消耗量高于数字产业化部门。

第二,化石能源消耗产生的碳排放是数字经济能源消耗碳排放的主要构成部分。2007、2012、2017 年各省份数字经济能源消耗产生的碳排放总量分别为 548.70 万吨、2941.42 万吨、2676.75 万吨,各省份数字经济化石能源消耗产生碳排放量分别为 382.38 万吨、1986.31 万吨、1566.20 万吨,分别占碳排放总量的 69.69%、67.53%、58.51%。2017 年煤炭发电量占发电总量的 71.8%,电力消耗产生碳排放大部分由煤炭燃烧造成。尽管化石能源消耗产生的碳排放量在数字经济整体能源消耗产生的碳排放总量中占据较大份额,但随着数字经济的不断发展和进步,这一比重正在呈现出逐渐下降的趋势。

第三,数字产业化部门能源消耗多为清洁能源,产业数字化部门能源消耗多为化石能源。2007、2012、2017年各省份数字产业化部门化石能源消耗产生碳排放量分别为264.37万吨、391.71万吨、170.94万吨,清洁能源消耗产生碳排放量分别为114.78万吨、126.94万吨、466.93万吨,数字产业化部门清洁能源消耗产生碳排放量分别占数字产业化部门能源消耗碳排放总量的30.27%、24.48%、73.20%。2007、2012、2017年各省份产业数字化部门化石能源消耗产生碳排放量分别为118.01万吨、1594.60万吨、1395.26万吨,产业数字化部门清洁能源消耗产生碳排放量分别为51.53万吨、828.17万吨、643.62万吨,产业数字化部门化石能源消耗产生碳排放量分别占产业数字化部门能源消耗碳排放总量的69.60%、65.82%、68.43%。数字产业化部门清洁能源消耗碳排放量占数字产业化部门能源消耗碳排放总量的比重整体呈上升趋势,产业数字化部门化石能源消耗碳排放量占产业数字化部门能源消耗碳排放总量的比重较高且占比稳定。

第四,能源消费效率效应对数字经济碳排放总量的增长具有抑制作用,能源结构强度效应、数字经济增长效应、人口规模效应对数字经济碳排放总量的增长起促进作用。能源消费效率效应在2007至2017年间的总贡献值为-680.89万吨,是唯一对数字经济碳排放总量的增长具有抑制作用的影响因素。2007至2012年间,能源消费效率效应对碳排放增长的贡献值为651.72万吨,对数字经济部门碳排放量增长呈现出促进作用。2012至2017年间,能源消费效率效应贡献值为-1332.61万吨,对数字经济部门碳排放量起到抑制作用,并且抑制作用非常强。数字经济增长效应在2007至2017年间的总贡献值为2251.03万吨,是导致数字经济部门碳排放增长的决定因素。能源结构强度效应和人口规模效益在2007至2017年间的总贡献值分别为418.51万吨和139.39万吨,对碳排放量的增长起着一定的促进作用。

6.2 对策建议

基于上述研究结论,提出以下四点建议。

第一,大力推进数字经济,加快数字产业发展。化石能源的使用是引起碳排放总量上升的主要因素,降低化石能源消耗比重是实现减排目标最直接的途径,而数字产业化部门能源消耗多为清洁能源,化石能源占比较低。要抓住数字经济

发展机遇，加强数字技术创新与应用，完善数字基础设施建设，着重发展高新技术产业，强化数字技术、人工智能等高新科技在传统经济中的应用，提高清洁能源、可再生能源的发电比例，着力推进数字产业化部门发展。

第二，加强数字基础设施建设，为碳减排赋予新动能。应当加速推进包括5G基站、云计算中心、大数据平台在内的承载数字技术的新型基础设施建设工程，为数字产业化和产业数字化提供稳固基石，从而促进数字经济与实体经济的深度融合。同时，要加快大数据、人工智能、云计算等关键技术的布局与发展，推动数字经济和数字技术更深入地融入传统行业，强化其在生产、生活、交通、通讯等多个领域的广泛应用，以实现资源利用效率的持续提升和能源消耗的有效降低。

第三，加快能源结构调整，提高能源利用效率。数字经济发展水平较高时，能源消费效率效应对碳排放总量呈现抑制作用，政府应当在发展数字经济时，重视数字经济对能源使用效率的影响，鼓励能源消费相关产业加强产业的数字化进程，推进相关行业的数字化转型。同时加大对能源转化效率相关研发的投入，不断研发碳捕捉、碳封存等技术，促进能源使用效率技术创新，提高能源消费效率效应抑制作用。

第四，明确数字经济发展省域差异，因地制宜实施数字减排战略。根据各省份资源禀赋，结合各省数字经济发展基础，引导各省围绕《“十四五”数字经济发展规划》《数字中国建设整体布局规划》等顶层设计，发挥自身优势，推动本地特色产业与数字经济融合发展。东部沿海地区数字经济发展水平较高的省份应分享成功经验，发挥模范引领作用，推动绿色发展，减少碳排放。中西部地区数字经济发展相对落后的省份应继续完善数字经济基础设施，结合自身实际，调整发展战略，缩小省份之间的数字经济水平差距，实现数字经济高速发展与碳减排的双赢目标。

参考文献

- [1] Tapscott D. The Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence. McGraw-Hill, New York, NY[J]. 1996.
- [2] Margherio L. The Emerging Digital Economy[R]. Department of Commerce, Washington, DC, 1999.
- [3] Lane N. Advancing the digital economy into the 21st century[J]. Information Systems Frontiers, 1999, 1(3): 317-320.
- [4] Kling R, Lamb R. IT and organizational change in digital economies: a socio-technical approach[J]. ACM SIGCAS Computers and society, 1999, 29(3): 17-25.
- [5] Miller P, Wilsdon J. Digital futures—an agenda for a sustainable digital economy[J]. Corporate Environmental Strategy, 2001, 8(3): 275-280.
- [6] 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.
- [7] Dahlman C, Mealy S, Wermelinger M. Harnessing the digital economy for developing countries[J]. 2016.
- [8] 康铁祥. 中国数字经济规模测算研究[J]. 当代财经, 2008(3): 118-121.
- [9] 何泉吟. 数字经济与信息经济、网络经济和知识经济的内涵比较[J]. 时代金融, 2011(29): 47.
- [10] 逢健, 朱欣民. 国外数字经济发展趋势与数字经济国家发展战略[J]. 科技进步与对策, 2013, 30(8): 124-128.
- [11] 金星晔, 伏霖, 李涛. 数字经济规模核算的框架、方法与特点[J]. 经济社会体制比较, 2020(4): 69-78.
- [12] 左鹏飞, 陈静. 高质量发展视角下的数字经济与经济增长[J]. 财经问题研究, 2021(9): 19-27.
- [13] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告(2023)[R/OL]. (2023-04-27) [2023-05-10]. http://www.caict.ac.cn/kxyy/qwfh/bps/202304/20230427_419051.htm.

- [14] Mesenbourg TL. Measuring the digital economy[J]. US Bureau of the Census, 2001, 1: 1-19.
- [15]中国信息通信研究院.中国数字经济发展白皮书(2017年)[R/OL].(2018-04-26) [2023-05-10].http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201804/t20180426_158452.htm.
- [16]关会娟,许宪春,张美慧,等.中国数字经济产业统计分类问题研究[J].统计研究,2020,37(12):3-16.
- [17]刘伟,许宪春,熊泽泉.数字经济分类的国际进展与中国探索[J].财贸经济,2021,42(7):32-48.
- [18]韩君,高瀛璐.中国省域数字经济发展的产业关联效应测算[J].数量经济技术经济研究,2022,39(04):45-66.
- [19]Andrae ASG, Edler T. On global electricity usage of communication technology: trends to 2030[J]. Challenges, 2015, 6(1): 117-157.
- [20] Belkhir L, Elmeligi A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations[J]. Journal of cleaner production, 2018, 177: 448-463.
- [21]渠慎宁,史丹,杨丹辉.中国数字经济碳排放:总量测算与趋势展望[J].中国人口·资源与环境,2022,32(09):11-21.
- [22]刘宇,吕郢康,周梅芳.投入产出法测算CO₂排放量及其影响因素分析[J].中国人口·资源与环境,2015,25(09):21-28.
- [23]彭水军,张文城,孙传旺.中国生产侧和消费侧碳排放量测算及影响因素研究[J].经济研究,2015,50(01):168-182.
- [24]杨丹辉,胡雨朦.投入数字化对工业碳排放强度影响的实证分析[J].城市与环境研究,2022,(04):77-93.
- [25]王彬.全球价值链视角下数字经济对中国碳排放的影响[J].资源科学,2023,45(09):1899-1911.
- [26] Ehrlich PR, Holdren JP. Impact of population growth[J]. Science, 1971, 171(3977): 1212-1217.
- [27] Du LM, Wei C, Cai SH. Economic development and carbon dioxide emissions in China: Provincial panel data analysis[J]. China Economic Review, 2012, Vol.23(2):

371-384

- [28] Brantley L. Impact of population, age structure, and urbanization on carbon emissions energy consumption: evidence from macro-level, cross-country analyses[J]. Population and Environment, 2014, 35(03): 286-304.
- [29] Ang BW, Zhang FQ, Choi KH. Factorizing changes in energy and environmental indicators through decomposition[J]. Energy, 1998, 23(6): 489-495.
- [30] 郭朝先. 中国碳排放因素分解: 基于 LMDI 分解技术[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(12): 4-9.
- [31] 王瑛, 何艳芬. 中国省域二氧化碳排放的时空格局及影响因素[J]. 世界地理研究, 2020, 29(03): 512-522.
- [32] 刘小丽, 王永利. 基于 LMDI 分解的中国制造业碳排放驱动因素分析[J]. 统计与决策, 2022, 38(12): 60-63.
- [33] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. 当代经济管理, 2022, 44(02): 68-78.
- [34] 王硕, 王海荣. 双碳目标背景下中国数字经济健康发展的策略研究[J]. 当代经济管理, 2022, 44(8): 11-16.
- [35] 郭丰, 杨上广, 任毅. 数字经济、绿色技术创新与碳排放——来自中国城市层面的经验证据[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2022, 51(03): 45-60.
- [36] 张传兵, 居来提·色依提. 数字经济、碳排放强度与绿色经济转型[J]. 统计与决策, 2023, 39(10): 90-94.
- [37] 贺铿. 关于信息产业和信息产业投入产出表的编制方法[J]. 数量经济技术经济研究, 1989, (02): 34-40+33.
- [38] 曾昭磐. 根据“全口径”投入产出表编制信息投入产出表的矩阵方法及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2001, (01): 36-40.
- [39] 郭朝先. 中国二氧化碳排放增长因素分析——基于 SDA 分解技术[J]. 中国工业经济, 2010, (12): 47-56.
- [40] 胡剑波, 任亚运, 郭风. 国际贸易碳排放指数分解法研究综述[J]. 环境科学与技术, 2016, 39(10): 69-72.
- [41] 孔潇扬, 李琦. 能源碳排放的空间估算研究进展[J]. 测绘科

- 学,2022,47(08):146-156+185.
- [42]郝陆.数字经济发展水平对中国区域碳排放强度的影响研究[D].辽宁大学,2023.
- [43]王群勇,李海燕.数字经济的节能减排效应[J].贵州财经大学学报,2023(3):81-90.
- [44]马港.数字经济发展对城市碳排放的影响:机制与效应[D].武汉:中南民族大学,2022.
- [45]苗韧,周伏秋,冯升波,等.信息与通信技术助推我国节能低碳发展[J].宏观经济管理,2013(11):60-61.
- [46]迟明园,石雅楠.数字经济促进产业结构优化升级的影响机制及对策[J].经济纵横,2022,(04):122-128.
- [47]韩君,张慧楠.中国经济高质量发展背景下区域能源消费的测度[J].数量经济技术经济研究,2019,36(7):42-61.
- [48]杨茜茜.数字经济发展、产业结构升级与碳排放[D].广州:广东财经大学,2023.
- [49]于林霞.煤电供应链竞合协调及收益分配机制研究[D].贵阳:贵州大学,2016.
- [50]韩君,陈俊松.中国省域数字经济的碳排放效应测算[J].开发研究,2024,(01):32-41.
- [51]江元,徐林.数字经济、能源效率和碳排放——基于省级面板数据的实证[J].统计与决策,2023,39(21):58-63.
- [52]卜敏.能源替代和煤炭技术进步对碳排放的影响研究[D].石家庄:河北地质大学,2023.
- [53]吴翌琳,王天琪.数字经济的统计界定和产业分类研究[J].统计研究,2021,38(6):18-29.
- [54]国家统计局令(第33号).数字经济及其核心产业统计分类(2021)[EB/OL].(2021-05-27)[2023-05-10].http://www.stats.gov.cn/xxgk/tjbz/gjtjba/202106/20210603_1818135.html.
- [55]许宪春,张美慧.中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J].中国工业经济,2020,(05):23-41.
- [56]朱发仓,乐冠岚,李倩倩.数字经济增加值规模测度[J].调研世

界,2021,(02):56-64.

[57]中国信息通信研究院.中国数字经济发展与就业白皮书(2018年)[R/OL].(2019-04-16)[2023-05-10].http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/201904/t20190416_197842.htm.

致谢

值此论文完成之际，我衷心感谢所有在我攻读硕士期间给予支持与帮助的人们。在这里，我要特别感谢我的导师和其他对我学业有所贡献的人。

首先，我要由衷地感谢我的导师韩君教授。韩老师在整个研究生生涯中给予了我无微不至的指导和悉心培养，韩老师严谨的学术态度和对待科研的热情激励着我不断努力。在研究过程中，不仅教会了我如何进行科研和论文写作，还引导我培养了批判性思维和问题解决能力，韩老师的辛勤付出和专业指导使我能够顺利完成我的研究工作。

我还要感谢兰州财经大学统计与数据科学学院的教师和同学们。在这里，我遇到了很多优秀的教师和朋友，感谢你们的悉心教导、热忱帮助和深入讨论。你们的学术分享和互相支持为我的研究工作提供了宝贵的启发和帮助。感谢学院的老师们为我们提供了良好的学习环境和资源支持，让我能够专注于科研工作。

此外，我要特别感谢我的家人和朋友们。感谢他们一直以来对我的理解、支持和鼓励。他们在我最困难的时刻给予了我精神上的慰藉和帮助，使我能够坚持下去。他们的爱与支持是我不断成长的动力。

最后，我要向所有为我学习和研究提供帮助的人们表示最诚挚的谢意。无论是提供资料和资源的朋友，还是给予经验和建议的同学，你们的帮助使我受益匪浅。没有你们的支持和鼓励，我难以想象我能取得这样的成就。

尽管篇幅有限，但请相信我对每一个帮助过我的人的感激之情是真挚而深刻的。感谢你们在我求学之路上的陪伴和支持。再次向所有帮助过我的人们表示衷心的感谢，你们的支持和鼓励是我取得研究生学位的关键。谢谢你们！