

数字经济通过能源利用效率对碳排放的影响

——基于市级面板数据的实证分析

王治然, 白丰睿

吉林财经大学统计学院, 吉林 长春

收稿日期: 2024年11月10日; 录用日期: 2024年12月6日; 发布日期: 2024年12月12日

摘要

本文以黑龙江、吉林、辽宁三省下辖的36个地级市、自治州和地区2010~2019年的面板数据为研究对象, 构建测度指标体系衡量各市的数字经济的年度发展水平, 以能源利用效率为路径, 进行基准回归、中介效应和调节效应分析, 探究数字经济的发展对碳排放的影响。根据研究结果本文得出结论: (1) 数字经济的发展对碳排放有抑制作用。(2) 数字经济通过提升能源的生产转化和消费效率抑制碳排放。(3) 数字经济通过能源生产和消费结构优化从而抑制碳排放。

关键词

碳排放, 数字经济, 能源利用效率, 中介效应

The Impact of Digital Economy on Carbon Emissions through Energy Efficiency

—An Empirical Analysis Based on Municipal Panel Data

Zhiran Wang, Fengrui Bai

Statistic School of Jilin University of Finance and Economics, Changchun Jilin

Received: Nov. 10th, 2024; accepted: Dec. 6th, 2024; published: Dec. 12th, 2024

Abstract

This article uses panel data from 36 prefecture level cities, autonomous prefectures, and regions under the jurisdiction of Heilongjiang, Jilin, and Liaoning provinces from 2010 to 2019 as samples to construct an indicator system to calculate the digital economy development index of each city. Through benchmark regression, mediation effect model, and moderation effect model, the impact

of digital economy on carbon emissions through energy utilization efficiency is analyzed. Based on the research results, it can be concluded that: (1) Digital economy deployment has suppressive effects on carbon emissions. (2) The digital economy suppresses carbon emissions through the mediating effects of improving energy production conversion efficiency and reducing energy consumption intensity. (3) The digital economy optimizes the energy production structure and suppresses carbon emissions.

Keywords

Carbon Emission, Digital Economy, Energy Efficiency, Mediating Effect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

改革开放以来, 我国的经济快速增长, 各项建设取得了重大成就, 同时由于以二氧化碳为主的温室气体的大量排放, 也造成了能源和生态污染问题。二十一世纪后, 经济发展与碳排放的矛盾更加凸显。随着“双碳”战略的颁布, 低碳减排已经成为我国经济发展的重点和保护生态环境的抓手。而近年来, 随着我国大力发展数字经济, 数字经济正逐渐融入各种经济活动。数字经济的发展可以显著缓解经济发展与碳排放之间的矛盾关系, 因此, 它成为了抑制碳排放、促进低碳发展的重要力量。实际情况和相关研究都表明, 数字经济对碳排放的重要影响因素之一是其对能源利用效率的改善。东北三省作为全国范围内能源消费强度较大、数字经济发展速度较快者, 以此地区的具体情况进行实证更有利于探究前述的关系。

2. 文献综述

我国长期以来都面对着经济发展和碳排放之间的矛盾带来的挑战。为了落实我国“双碳”两个目标, 寻找低碳减排的理论依据和有效路径, 学者们从多个角度分析碳排放的影响因素。研究发现, 经济、能源和人口效益等宏观因素是碳排放的主要影响因素[1], 邓吉祥等发现, 能源强度效应和能源结构对碳排放影响较强[2]; 胡鞍钢等则提出, 控制能耗、提升能源利用效率、改善能源结构已形成“政策合力”是推动经济社会绿色转型的有效手段[3]。显然, 在诸多影响碳排放的因素中, 能源领域是非常重要的研究方向。

与此同时, 在我国大力发展数字经济的背景下, 能源利用效率在数字经济对于碳排放的影响机制中是具有高研究价值的中介因素。学者们在碳减排的研究过程中发现, 数字经济的发展能够提高能源的生产和消费环节的效率, 改善能源结构[4]。与之对应的, 数字经济的发展能够显著降低碳排放的水平和强度, 缓解经济发展和碳排放之间的矛盾[5], 对于我国产业调整和经济高质量发展具有积极作用。

目前, 就数字经济、能源利用效率和碳排放之间的关联, 有众多学者进行了研究, 但是研究仍存在着些许短板。首先, 主要关注能源分配和消费环节的效率, 而在能源生产环节的效率的作用则讨论较少; 其次, 对于数字经济、碳排放和能源利用效率之间的关系, 以理论分析和逻辑推理居多而实证分析较少。相关的优秀研究如冯子翔等发现, 能源利用效率是数字经济影响碳排放的基本途径并剖析了其现实机理[6]; 罗良忠等则发现, 能源利用效率在数字经济对碳排放影响过程中确有中介效应存在[7]。由于研究视角和方法的不同, 给本文留下了为其提供补充的空间。

基于以上介绍的背景, 本文将能源利用效率在数字经济和碳排放间的中介效应作为研究重点, 以市级面板数据作为研究对象, 以中介效应和调节效应作为出发点、能源利用效率作为研究路径, 对数字经

济的发展对碳排放的影响关系进行研究, 提供一个较新的研究视角、简化该逻辑关系并对其进行实证检验。希望能够寻求能源利用效率路径上, 数字经济对于碳排放的较为清晰的作用关系, 并探寻该影响的程度, 对于碳减排具有一定的现实意义。

3. 理论机制与研究假设

3.1. 数字经济对碳排放的影响

数字经济的发展改善了生产方式, 云计算、互联网等数字技术在不同产业间的应用, 缩短了时空之间的差距, 有效提升生产要素的调配和利用效率, 从而降低总体的碳排放水平。在产业结构和产业链、行业链层面上, 数字经济推动产业结构的优化升级, 促进新兴绿色产业的发展[8]。数字技术的应用还可促进生产要素向高效率产业部门的转移, 进而产生对产业碳排放量的抑制作用。在行业、企业层面上看, 数字经济增强了同一产业链上企业之间的联系以及企业内部的联系, 进而能够提升生产要素在产业链上的配置效率和企业内部资源分配的效率, 通过更加密切的数据、技术和科学创新共享, 产业的碳生产率得以提高, 从而产生减排的效果[9]。在个人生活层面上看, 数字经济的发展、数字技术的普及可以提高居民日常活动的数字化水平, 从而在整体上实现低碳的效果。基于上述分析, 提出以下假设:

假设 1: 数字经济对碳排放呈现负相关关系。

3.2. 能源生产转化效率和消费效率的中介效应

能源利用效率, 在生产转化方面和消费效率两个方面都与碳排放有着直接的负向联系[10], 而数字经济的增长对能源利用效率则具有显著的影响。首先, 在能源生产方面, 数字经济的发展推进数字技术应用于科研、调控和决策能源的生产转化过程, 减少不必要的能源损失, 有效地实现减排。其次, 根据研究, 在能源消费方面, 当能源消费者引进数字技术进行能源消费时, 其能源配置效率和使用效率都可得到较大的优化, 同时, 数字经济带来的网络外部性也会作为同类企业的参考依据, 从而扩大在能源消费端采用数字技术的企业数量, 达到提升产业能源消费效率提升、能源消费强度, 达到降低总体碳排放的效果[11]。基于上述分析, 提出以下假设:

假设 2: 数字经济通过能源的生产转化效率和消费效率的中介效应抑制碳排放。

3.3. 能源结构优化的调节效应

从能源利用结构的角度来看, 能源分配效率的提升主要表现为能源生产结构的优化和能源消费结构的优化。优化能源生产结构的最直接表现是可再生清洁能源如风能和太阳能在全社会能源生产中所占比重逐步提高。能源消费结构的优化则主要体现在能源在不同产业、地区、城乡之间的消费分配逐渐稳定且高效。由于能源配置效率的变化受国家政策、生产消费结构、地区经济差异等多种因素的影响, 数字经济并不能单独决定能源配置效率的变化, 但数字经济可以通过调节作用对能源配置效率发挥一定作用, 从而抑制碳排放[12]。基于上述分析, 提出以下假设:

假设 3: 数字经济通过对能源结构的生产和消费结构的调节作用间接抑制碳排放。

4. 研究设计

4.1. 模型设定

为了检验假设 1, 构建基准模型 1 以检验数字经济与碳排放之间的作用[13], 模型形式如下:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 dig_{it} + \beta_2 \sum control_{it} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

该模型为静态面板回归模型, 并对双项固定效应进行控制。在式(1)中, i 为不同的市级行政区, t 为年份, y_{it} 为第 i 市(或地区) t 年的碳排放, 处于被解释变量的地位, dig_{it} 为第 i 市(或地区) t 年的数字经济发展指数, 是模型中的解释变量, $\Sigma control_{it}$ 代表模型中 6 个控制变量的组合, φ_i 与 γ_t 代表对个体固定效应和时间固定效应的控制, ε_{it} 是随机扰动项。

为了检验假设 2, 即探究能源利用效率在数字经济发展和碳排放的中介效应, 构建模型 2:

$$y_{it} = \beta_0 + \beta_1 dig_{it} + \beta_2 \Sigma control_{it} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$M_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 dig_{it} + \alpha_2 \Sigma control_{it} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$y_{it} = \theta_0 + \theta_1 dig_{it} + \theta_2 M_{it} + \theta_3 \Sigma control_{it} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

参考温忠麟等(2020)的中介效应分析框架[14], 在式(3)、(4)中, M_{it} 代表中介变量, 其他变量与式(1)相同, 中介因素包括能源生产转化效率及能源消费效率。

为检验假设 3, 即探究数字经济对能源生产、消费结构的调节作用, 构建模型 3:

$$y_{it} = \delta_0 + \delta_1 dig_{it} + \delta_2 R_{it} + \delta_3 R_{it} \times dig_{it} + \delta_4 \Sigma control_{it} + \varphi_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

参考 McClelland 等(1993)的调节效应分析框架[15], 式(5)中, R_{it} 为测度变量, δ_3 为衡量调节效应的交互项, 其他变量与式(1)相同。

4.2. 变量选取

1) 被解释变量: 碳排放(ce), 以地区碳排放强度衡量。本文采用中国碳核算数据库中的市级碳排放总量指标。为了便于计算, 对该变量的数值取自然对数。

2) 解释变量: 数字经济(dig), 本文参考有关数字经济测度指标的相关研究[16] [17], 就各地区的市级面板数据构建了指标体系, 以该指标体系估计的发展指数衡量地区数字经济的发展情况, 具体如表 1 所示。

Table 1. Index system for measuring the development level of digital economy

表 1. 数字经济发展水平测度指标体系

目标层	准则层	指标层	指标说明
数字经济	数字产业发展	软件产业发展	软件产品收入(亿元)
		信息产业发展	信息技术服务收入(亿元)
		电子商务产业发展	电子商务销售额(亿元)
	数字经济基础建设	光缆基础	光缆总长度(万公里)
		移动电话基站	移动电话基站数量(万个)
		宽带互联网基础	国际互联网用户数量(万户)
	数字应用水平	移动电话使用水平	移动电话普及率(部/百人)
		计算机使用水平	计算机使用率(台/百人)
		网站使用水平	企业网站使用数量(个)

数字经济发展指数的计算采用熵值法, 对指标权重进行测算, 其具体公式如下:

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \ln \frac{Z_{ij}}{\sum_{i=1}^n Z_{ij}} \right) \quad (6)$$

$$w_j = (1 - E_j) / \sum_{j=1}^m (1 - E_j) \quad (7)$$

$$dig = \sum_{j=1}^m w_j z_{ij} \quad (8)$$

其中, E_j 代表第 j 个指标的信息熵, w_j 代表第 j 个指标的权重。

3) 控制变量: 选取与数字经济发展有较大相关性的 6 个变量作为控制变量, 包括: 工业化水平(ind), 以地区年度工业增加值与地区生产总值的比值衡量; 城市化水平(urb), 以地区城镇常住人口占总人口的比重衡量; 对外贸易水平(op), 以地区进出口贸易额占地区生产总值的比重衡量, 进出口贸易额均以当年年度平均利率折合人民币单位进行计算; 地区人均收入(inc), 选择地区常住居民的人均可支配收入代表; 货运水平(tr), 选择地区年度货运量进行衡量; 创新发展水平(tec), 以地区内与数字经济相关专利的授权数代表。 inc 、 tr 和 tec 作为绝对指标, 其数值为便于计算也取自然对数。

4) 中介变量: 能源转化率(te), 选择地区内电能转换率进行衡量, 该变量越大, 代表地区能源转化率越高; 能源消费强度(ci), 能源消费量与地区生产总值的比值, 该变量越大, 代表地区能源消费效率越低。

5) 调节效应变量: 能源生产结构(cs), 为衡量其优度, 选择计算地区水力发电、太阳能发电及核电发电量与地区总发电量的比值, 该变量越大, 地区能源生产结构越优; 能源消费结构优化(ed), 由于更加合理的消费结构会使乡村与城市的能源消费差距减小, 因此为衡量消费结构的优度, 选择计算乡村电力消费与城镇电力消费量的比值, 该变量越大, 能源消费结构越优。

4.3. 数据来源

本文数据来源于中国碳核算数据库、中经数据库、《中国信息年鉴》、《中国统计年鉴》。

5. 实证分析

5.1. 自变量描述性统计

根据所收集的面板数据和已构建的数字经济发展指标体系, 以熵值法估算得到的黑龙江省、吉林省、辽宁省下辖各地级市、自治州和地区 2010 至 2019 年数字经济发展指数如表 2 所示。

Table 2. Digital economy development index of each city from 2010 to 2019

表 2. 各市 2010~2019 年数字经济发展指数

城市	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
哈尔滨	0.095	0.096	0.099	0.101	0.102	0.104	0.109	0.115	0.119	0.121
齐齐哈尔	0.089	0.087	0.091	0.093	0.098	0.103	0.107	0.113	0.114	0.116
鸡西	0.072	0.073	0.072	0.076	0.077	0.079	0.081	0.084	0.088	0.092
鹤岗	0.056	0.058	0.062	0.063	0.065	0.066	0.067	0.068	0.069	0.071
双鸭山	0.061	0.062	0.065	0.067	0.068	0.071	0.073	0.075	0.076	0.081
大庆	0.087	0.091	0.092	0.094	0.096	0.099	0.102	0.106	0.112	0.115
伊春	0.053	0.058	0.059	0.061	0.064	0.065	0.064	0.069	0.072	0.074
佳木斯	0.076	0.079	0.081	0.081	0.083	0.088	0.092	0.093	0.096	0.099
七台河	0.048	0.053	0.054	0.056	0.060	0.061	0.061	0.063	0.065	0.068
牡丹江	0.083	0.086	0.084	0.089	0.091	0.095	0.097	0.099	0.101	0.103

续表

黑河	0.069	0.073	0.074	0.078	0.080	0.082	0.086	0.088	0.091	0.094
绥化	0.083	0.085	0.087	0.091	0.093	0.096	0.099	0.101	0.104	0.108
大兴安岭	0.029	0.031	0.033	0.037	0.039	0.040	0.043	0.045	0.046	0.048
长春	0.133	0.133	0.131	0.127	0.124	0.122	0.125	0.123	0.123	0.121
吉林	0.109	0.107	0.105	0.103	0.102	0.098	0.094	0.097	0.094	0.096
四平	0.094	0.095	0.099	0.094	0.092	0.098	0.102	0.097	0.104	0.102
辽源	0.093	0.094	0.098	0.094	0.098	0.099	0.100	0.096	0.101	0.100
通化	0.101	0.100	0.098	0.104	0.102	0.102	0.102	0.101	0.103	0.102
延边	0.098	0.094	0.096	0.091	0.095	0.102	0.102	0.103	0.106	0.105
白城	0.091	0.094	0.090	0.094	0.097	0.095	0.101	0.097	0.096	0.101
松原	0.099	0.098	0.098	0.101	0.103	0.102	0.099	0.101	0.098	0.104
梅河口	0.068	0.070	0.075	0.073	0.071	0.076	0.079	0.074	0.078	0.076
沈阳	0.123	0.118	0.118	0.118	0.116	0.117	0.119	0.118	0.121	0.119
大连	0.127	0.120	0.116	0.117	0.120	0.123	0.124	0.123	0.118	0.116
鞍山	0.108	0.104	0.105	0.103	0.101	0.099	0.099	0.097	0.096	0.095
抚顺	0.083	0.081	0.084	0.086	0.087	0.094	0.091	0.089	0.092	0.090
本溪	0.088	0.084	0.082	0.086	0.085	0.088	0.089	0.093	0.093	0.091
丹东	0.076	0.079	0.081	0.083	0.082	0.086	0.086	0.090	0.091	0.090
锦州	0.091	0.092	0.096	0.094	0.102	0.102	0.103	0.105	0.102	0.101
营口	0.092	0.090	0.098	0.096	0.100	0.097	0.101	0.099	0.096	0.095
阜新	0.069	0.068	0.067	0.071	0.074	0.072	0.071	0.073	0.071	0.075
辽阳	0.086	0.086	0.089	0.086	0.083	0.081	0.089	0.087	0.086	0.082
铁岭	0.067	0.070	0.073	0.073	0.075	0.078	0.076	0.074	0.081	0.079
朝阳	0.084	0.083	0.091	0.089	0.088	0.085	0.084	0.091	0.089	0.092
盘锦	0.097	0.101	0.104	0.099	0.106	0.095	0.103	0.100	0.099	0.096
葫芦岛	0.074	0.077	0.079	0.081	0.082	0.082	0.083	0.086	0.086	0.083

表中数据均为正数且显著大于 0，因此可以发现，在 2010 至 2019 年，黑龙江省、吉林省、辽宁省各地级市、自治州和地区的数字经济发展情况较好。在这段时间内，东北地区的碳排放总量呈现逐年增长但幅度降低的态势，故可以合理地推测，东北地区城市数字经济的蓬勃发展对于碳减排是有所助益的。

5.2. 基准模型回归分析

5.2.1. 面板单位根检验和模型选择检验

Table 3. Unit root inspection results
表 3. 单位根检验结果

变量	Fisher 检验	P 值
ce	-5.671	0.000

续表

<i>dig</i>	-6.130	0.000
<i>ind</i>	-6.089	0.000
<i>urb</i>	-7.059	0.000
<i>op</i>	-5.617	0.000
<i>inc</i>	-9.502	0.000
<i>tr</i>	-7.114	0.000
<i>tec</i>	-7.019	0.000
<i>te</i>	-6.315	0.000
<i>ci</i>	-9.445	0.000
<i>cs</i>	-13.246	0.000
<i>ed</i>	-8.045	0.000

本文选择 Fisher 检验进行面板单位根检验，以避免由于数据的非平稳性产生的伪回归问题，检验结果如表 3 所示。

由 Fisher 检验的结果可见，所有变量的 P 值均为 0.000，这些变量都能被证明具有平稳性。

本文选择 Hausman 检验进行模型选择检验，其结果如表 4 所示。

Table 4. Hausman test results

表 4. Hausman 检验结果

Hausman 检验	统计量	P 值
chi ² (9)	36.21	0.000

可见 P 值为 0.000，拒绝了原假设，可以认为应当使用固定效应模型。

5.2.2. 基准模型回归

表 5 为数字经济对碳排放直接影响的基准模型结果。在表格中，模型 2 是普通线性回归模型，模型 1 是未引进控制变量的双向固定效应模型，模型 3 在模型 1 的基础上加入了控制变量，模型 4 则采用了全面 FGLS 估计，模型 1、3、4 均对时间和个体固定效应进行控制。

Table 5. Regression results of benchmark model

表 5. 基准模型回归结果

变量	模型 1	模型 2	模型 3	模型 4
	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ce</i>	FGL <i>ce</i>
<i>dig</i>	-0.184** (0.085)	-0.076** (0.035)	-0.089** (0.037)	-0.086** (0.042)
<i>ind</i>		2.137* (1.140)	1.739* (1.207)	1.646* (0.945)
<i>op</i>		-2.544** (1.239)	-1.451* (0.720)	-2.031* (1.523)
<i>inc</i>		0.976*** (0.270)	1.425*** (0.824)	1.181*** (0.942)
<i>tr</i>		0.027 (0.168)	0.047 (0.132)	0.041 (0.119)
<i>tec</i>		-0.025** (0.091)	-0.044** (0.072)	-0.039** (0.066)

续表

<i>urb</i>		0.356 (0.815)	0.511 (0.876)	0.525 (1.104)
<i>_cons</i>	-4.475*** (1.034)	-7.943*** (1.232)	-6.229*** (1.714)	-6.657*** (0.988)
时间固定效应	是	否	是	是
个体固定效应	是	否	是	是
Wald 检验				0.000
Wooldrige 检验				0.000
Bruesch-Pagan LM 检验				0.000
N	345	301	301	301
R ²	0.715	0.783	0.914	0.727

注：***、**、*分别表示在 1%、5%、10%的置信水平下显著，括号中为 *t* 值(此后表同)。

结果显示，模型 1 的估计系数为-0.184，模型 3 的估计系数为-0.089，可见控制变量并不会影响数字经济的发展对碳排放显著的负向影响。模型 2 的结果为-0.076，同样能够证明数字经济的发展和碳排放存在显著的负相关关系，这个结果与前述两个双向固定效应模型相同。同时，为了提高估计精度，本文在模型 4 中使用了全面 FGLS 进行估计，由其估计系数-0.086，可以得到一致的结论。模型 1 至模型 4 的回归结果表明，数字经济的发展对碳排放有显著的负向作用，可以证实假设 1。

5.3. 中介效应分析

表 6 为中介效应模型逐步回归的回归结果。根据检验结果，第一，*dig* 对 *te* 的影响系数为 0.076，*te* 对 *ce* 的影响系数为-0.362，*dig* 对 *ce* 的影响系数为-0.088，以上的结果均在 5%的置信水平上显著，该结果表明，数字经济的发展可以提高作为中介因素 1 的能源生产转化效率，而能源生产转化效率的提高则对被解释变量碳排放产生抑制，因此数字经济的发展能通过提高能源生产转化效率从而降低碳排放。

Table 6. Mediating effect test results
表 6. 中介效应检验结果

变量	中介变量模型 1		中介变量模型 2	
	OLS <i>te</i>	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ci</i>	OLS <i>ce</i>
<i>dig</i>	0.078** (0.231)	-0.082** (0.079)	-0.051* (0.058)	-0.069** (0.040)
<i>te</i>		-0.383** (0.491)		
<i>ci</i>				0.937*** (0.288)
控制变量	是	是	是	是
<i>_cons</i>	-3.153*** (0.245)	-8.469*** (1.227)	1.835*** (1.423)	-3.781*** (0.702)
时间固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
N	278	278	305	305
R ²	0.845	0.472	0.631	0.682

第二，*dig* 对 *ci* 的影响系数为-0.053，该结果在 10%的置信水平上显著，*ci* 对 *ce* 的影响系数为 0.971，

该结果在 1%的置信水平上显著, *dig* 对 *ce* 的影响系数为-0.075, 该结果在 5%的置信水平上显著, 以上结果表明数字经济的发展对中介变量 2 能源消费强度有着负向作用, 由于更低的能源消费强度代表着更高的能源消费效率, 此结果说明了数字经济的发展与能源消费效率呈现正相关的关系, 对于能源消费效率来讲则对碳排放有着负向作用。所以根据以上结果, 数字经济可以通过降低能源消费效率来抑制碳排放。这样, 使假设 2 得到证实。

5.4. 调节效应分析

在进行调节效应检验前, 先对交互项进行中心化处理。对调节效应模型的相关变量进行 VIF 检验的结果均小于 3, 可以认为该模型较为理想, 变量间不存在明显的多重共线性情况, 符合调节效应分析的条件。

表 7 为调节效应模型逐步回归的结果, 根据结果可见, *es*、*ed* 对被解释变量的影响都不显著, 说明能源生产和消费结构的优化对碳排放的影响均不清晰。两个交互项代表着调节效应, 从它们对被解释变量的影响来看, *dig* × *es* 对 *ce* 的影响系数为-0.049, *dig* × *ed* 对 *ce* 的影响系数为-0.183, 两个结果均在一定的置信水平上显著, 这代表了数字经济对能源生产和消费结构优化有调节效应, 数字经济确实可以依靠对能源生产和消费结构的优化达到碳减排的效果, 因此, 可以使假设 3 成立。

Table 7. Moderating effect test results
表 7. 调节效应检验结果

变量	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ce</i>	OLS <i>ce</i>
<i>dig</i>	-0.068** (0.214)	-0.077** (0.043)	-0.056* (0.045)	-0.086** (0.042)
<i>es</i>	-0.345 (0.352)	-0.378 (0.425)		
<i>dig</i> × <i>es</i>		-0.049* (0.231)		
<i>ed</i>			0.041 (0.252)	0.087 (0.371)
<i>dig</i> × <i>ed</i>				-0.183* (0.356)
控制变量	是	是	是	是
_cons	-7.644*** (0.211)	-6.445*** (1.374)	-6.331*** (1.381)	-7.514*** (0.820)
时间固定效应	是	是	是	是
个体固定效应	是	是	是	是
N	305	305	305	305
R ²	0.444	0.562	0.489	0.401

5.5. 稳健性检验

本文从构建面板模型、替换变量、剔除城市样本三方面进行稳健性检验[18], 具体结果如表 8 所示。

构建面板模型: 本文构建动态面板模型, 对应结果为模型 5。可见第二个变量的 *P* 值为 0.625, 大于 0.05; Hansen 检验的结果为 0.708, 大于 0.05, 据此能够排除随机误差项自相关和变量过度识别的问题。该动态模型面板回归的结果表明, 基准回归的结果具有一定的稳健性。

替换变量: 引入新的变量人均碳排放(*pc*), 以地区碳排放强度与常住人口之比衡量, 同时取自然对数, 用以代替原被解释变量 *ce*; 同时, 将控制变量中 *tr* 的衡量指标替换为地区总客运量取自然对数, *tec* 的衡量指标替换为工业企业 R & D (研究与开发)经费支出取自然对数。替换变量所对应的模型 6 结果为-0.057, 模型 7 的结果为-0.092, 且均在 5%的置信水平上显著, 显然再替换变量后数字经济对碳排放仍旧具有较强的负向影响。

剔除特大城市样本：由于样本中的大城市在数字经济发展和能源效率优化上都与其他地级市有着较大差距，因此本文剔除哈尔滨市、长春市、沈阳市、大连市的样本以后再次进行估计，对应为模型 8，回归系数的结果为-0.087，且保持显著，以上结果都与基准回归模型的结果相符合。

Table 8. Robustness test results
表 8. 稳健性检验结果

变量	模型 5	模型 6	模型 7	模型 8
	动态面板模型	替换被解释变量	替换解释变量	剔除大城市样本
	<i>ce</i>	<i>pc</i>	<i>ce</i>	<i>ce</i>
L	1.145*** (0.491)			
<i>dig</i>		-0.057** (0.402)	-0.092** (0.098)	-0.087* (0.081)
控制变量		是	是	是
_cons		-2.281*** (1.985)	-6.403*** (6.544)	-5.556*** (3.260)
时间固定效应		是	是	是
个体固定效应		是	是	是
AR (1)	0.007			
AR (2)	0.625			
Hansen 检验	0.708			
N	305	305	305	265
R ²	0.514	0.441	0.485	0.358

为检验中介效应分析的结果，本文对中介效应分析的结果进行了 Bootstrip 检验，其中介效应置信区间不包含 0，可以认为存在中介效应，与中介效应分析的结果一致。

6. 结论与建议

本文通过分析东北地区数字经济、能源利用效率和碳排放三者间的作用关系，得出了以下结论：(1) 数字经济的发展对于地区的碳排放具有显著的负向作用；(2) 数字经济的发展对地区碳排放的负向作用中存在着中介机制，能源利用效率在生产端和消费端都是重要的中介因素，在数字经济对碳排放的影响过程中充当关键因素；(3) 调节作用使得数字经济的发展能够通过优化能源生产和消费结构的方式对碳排放产生抑制作用。

基于上述结论，提出如下建议：(1) 支持数字经济的发展。通过加强数字经济基础建设、鼓励企业加快数字化转型、保障数据安全和隐私、加强数字经济人才培养等方案，促进数字经济的发展，把握信息技术飞速发展的机遇。同时，巩固数字经济在我国节能减排领域的重要地位，发挥关键作用；(2) 加强数字经济与能源领域的结合。通过促进数字技术在能源产业中的应用、加强数字经济与可再生能源相融合、提升能源使用产业链的数字化程度、推进能源消费端的数字化转型等方式，在能源利用这一通路上更有效地发挥数字经济对节能减排的重要作用；(3) 促进数字经济对能源生产结构中的优化作用。通过推动能源生产数字化、优化能源产业链的数字化管理、促进数字技术与可再生能源生产相结合等方法，充分发挥数字经济对能源生产结构的优化作用及节能减排的潜力。

参考文献

[1] Yu, A., Lin, X., Zhang, Y., Jiang, X. and Peng, L. (2019) Analysis of Driving Factors and Allocation of Carbon Emission

- Allowance in China. *Science of the Total Environment*, **673**, 74-82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.047>
- [2] 邓吉祥, 刘晓, 王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. 自然资源学报, 2014, 29(2): 189-200.
- [3] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [4] Chen, L. (2021) How CO₂ Emissions Respond to Changes in Government Size and Level of Digitalization? Evidence from the BRICS Countries. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 457-467. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15693-6>
- [5] 王香艳, 李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排? [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(11): 83-95.
- [6] 冯子洋, 宋冬林, 谢文帅. 数字经济助力实现“双碳”目标: 基本途径、内在机理与行动策略[J]. 北京师范大学学报(社会科学版), 2023(1): 52-61.
- [7] 商圣颖, 刘文菊, 梁大林. 中国工业出口贸易中隐含碳排放测算与影响因素分析[J]. 中国集体经济, 2023(33): 33-36.
- [8] 梁靓, 卞梦颖. 数字经济、产业结构与碳排放——基于我国省域层面制造业视角[J]. 现代管理科学, 2024(3): 23-33.
- [9] 陈新华. 认清碳的身份碳中和如何科学理性[J]. 科学大观园, 2021(10): 26-29.
- [10] 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(9): 11-21.
- [11] 张传兵. 数字经济如何影响碳排放强度?——基于产业结构高级化与合理化的双重视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2024, 45(10): 56-73.
- [12] 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(3): 45-60.
- [13] 王凯, 关锐, 胡鸣镝, 等. 数字经济与碳排放绩效: 以中国 276 个城市为例[J]. 环境科学研究, 2023, 36(9): 1824-1834.
- [14] 温忠麟, 叶宝娟. 中介效应分析: 方法和模型发展[J]. 心理科学进展, 2014, 22(5): 731-745.
- [15] McClelland, G.H. and Judd, C.M. (1993) Statistical Difficulties of Detecting Interactions and Moderator Effects. *Psychological Bulletin*, **114**, 376-390. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.114.2.376>
- [16] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J]. 中国工业经济, 2020(5): 23-41.
- [17] 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.
- [18] 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.