

数字经济对碳排放强度的影响

——外国直接投资的调节作用

迟丽衡

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月11日; 发布日期: 2024年4月16日

摘要

数字经济的快速广泛发展为达到碳排放峰值和碳减排工作注入了新的动力, 也预示着能源领域的重大变革。本文选取2010~2019年70个主要国家的面板数据作为样本, 利用熵值法构建衡量各国数字经济发展水平的指标体系, 研究各国数字经济发展与碳排放强度的发展状况。本研究利用包含曲线调节效应的回归模型, 研究碳排放强度如何受到数字经济的影响, 同时也考虑了外国直接投资(FDI)的调节作用。研究结果明确证实, 数字经济与碳排放之间存在显著的倒U型关系。随着数字经济的发展, 它从促进碳排放转向减少碳排放。改善外国直接投资在调节数字经济与碳强度的关系中发挥了关键作用。在外国直接投资的调节作用下, 曲线的形状趋于平缓。基于以上结论, 本文提出了有针对性的建议, 以抑制碳排放, 进一步改善生态环境。

关键词

数字经济, 外国直接投资, 碳强度, 调节效应, 倒U型关系

Impact of Digital Economy on Carbon Emission Intensity

—The Moderating Effect of FDI

Liheng Chi

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 20th, 2024; accepted: Mar. 11th, 2024; published: Apr. 16th, 2024

Abstract

The rapid and widespread development of digital economy has given renewed impetus to efforts

文章引用: 迟丽衡. 数字经济对碳排放强度的影响[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(2): 388-400.

DOI: 10.12677/orf.2024.142144

to peak and reduce carbon emissions, and has heralded significant changes in the energy sector. In this paper, panel data of 70 major countries from 2010 to 2019 are selected as samples, and an indicator system is constructed to measure the level of digital economy development in each country using the entropy weight method to study the development status of digital economy development and carbon emission intensity in each country. This research utilizes a regression model incorporating curve moderating effects to investigate how the carbon emission intensity is influenced by the digital economy, while also considering the moderating influence of foreign direct investment (FDI). The findings unequivocally confirm the presence of a noteworthy U-shaped relationship between the digital economy and carbon emissions. As the digital economy progresses, it moves from supporting to reducing carbon emissions. Improving FDI plays a critical part in regulating the digital economy's relationship to carbon intensity. The shape of the curve is flattened by the moderating effect of FDI. Based on the obtained conclusions, the paper puts forward targeted recommendations in order to curb carbon emissions and further improve the ecological environment.

Keywords

Digital Economy, Foreign Direct Investment, Carbon Intensity, Moderating Effect, Inverted U-Shaped Relationship

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. 绪论

数字经济作为一种变革性的经济增长模式，出现于 20 世纪 90 年代。这种以优化效率和简化经济结构为目标的经济活动集合，极大地颠覆了传统的经济模式，为社会进步带来了创新的前景。

气候破坏是全球可持续发展面临的最严重危险之一。大量长期观测的证据表明，气候破坏与温室气体排放密切相关。近年来，世界各国纷纷踏上应对气候变化的征程，将目光投向碳中和与碳达峰目标。正如(Yu *et al.*, 2022) [1]所强调的，世界各国的共同努力反映了他们解决经济增长与环境保护相协调这一复杂难题的决心。这些举措在全球范围内产生了巨大的推动力，全球 130 多个国家和地区正在努力实现“零碳”或“碳中和”气候目标(United Nations Climate Change, 2021) [2]。

在数字经济时代，碳排放与经济形态之间究竟存在怎样的关系，目前尚无定论。一方面，数字经济为国际低碳发展提供了机遇。一些研究者从理论和实践两方面提出了数字经济能够大幅减少二氧化碳排放的观点，同时通过数字化过程抑制能源消耗(Wu *et al.*, 2021, 2021; Ishida, 2015) [3] [4] [5]。数字经济可以降低交易成本，减少资源错配，提高生产效率，减少资源和能源损耗，在有效推动经济高质量发展、提升创新能力的同时，也体现出一定的减碳减排和环境改善效果。另一方面，一些专家持有不同的观点。他们认为，数字经济的快速发展确实推动了经济发展，但同时也增加了能源需求，导致全球碳排放强度飙升(Azam *et al.*, 2021; Ren *et al.*, 2021) [6] [7]。数字经济的发展可能会促进一些新兴经济活动，如数字制造和互联网金融。这些活动可能会通过刺激电力消耗而导致碳排放的增加。

外国直接投资的数量和质量对东道国的数字经济和碳排放有着深远的影响。这一复杂的过程从多个方面影响了数字经济与碳排放之间的关系。首先，外国直接投资往往伴随着技术的引入，尤其是在数字经济领域。这不仅促进了当地的数字化，还推动了更高效的生产方式，有助于减少碳排放。其次，数字

经济的发展可促使当地产业结构向清洁、低碳方向演变。外国直接投资的涌入加速了这一进程，促使碳密集型产业减少，让清洁技术和数字产业逐渐占据主导地位。此外，外国直接投资还有可能改变全球价值链，加强企业与全球供应链的联系，提高资源配置效率，减少全球碳排放。

与以往的研究相比，本文在几个关键领域做出了独特的贡献。1) 本文研究了数字经济发展对碳排放强度的非线性影响。随着数字经济的发展，碳排放强度最初可能会增加，但超过一定阈值后，数字经济的进一步增长会导致碳排放强度下降。2) 采用调节效应模型进行分析。文章研究了不同程度 FDI 如何影响数字经济与碳排放的关系。重点是曲线形态的变化和拐点的移动。

第 2 章介绍文献综述。第 3 章为理论分析和假设。第 4 章介绍方法和数据。第 5 章为实证结果。最后，我们提出了结论和政策建议。

2. 文献综述

与传统经济生产方式相比，数字经济更强调数字信息技术、数字技术产业及其面向市场的应用。进入 21 世纪以来，全球信息技术不断进步。新一代信息和通信技术(ICT)有望推动传统工业经济向以技术为基础的新经济转型。

经济学认为，经济发展会带来外部效应。一些学者认为，数字经济也可能对环境产生不利影响，从而促使在这一领域开展进一步的研究。由于互联网技术的应用带来了生产技术升级和产业结构调整等多方面的经济影响，绿色经济和互联网受到了广泛关注。这些升级和进步可通过一系列途径影响污染物排放，包括能源利用、经济增长和产业结构调整(Kwon *et al.* 2014; Shin and Choi 2015; Hampton *et al.* 2013)。[8] [9] [10]。此外，互联网还通过有效的能源利用、经济发展和工业结构升级来影响污染物排放(Dong *et al.*, 2022, 2022) [11] [12]。网络降低了多个行业对能源的依赖，并有助于优化其结构(Ishida, 2015)。数字经济为降低工业能源依赖、改善产业结构、促进绿色金融和绿色投资做出了巨大贡献，随着互联网技术的不断发展和应用，数字经济将继续为节能减排提供更多可能。

一些研究表明，数字经济的增长可能会对环境造成负面影响。信息和通信技术(ICT)的集聚可能会通过技术创新间接减少碳排放。经济规模的扩大也会对碳排放产生积极影响。ICT 的广泛应用无疑提高了能源的使用效率(Wang *et al.*, 2022) [13]。然而，非金属制造业能源需求的相应增长导致了碳排放量的激增(Jin and Yu, 2022) [14]。此外，向数字经济的演进取决于快速发展的互联网技术。互联网基础设施的广泛部署和互联网应用的迅速普及势必导致该地区电力和能源消耗的增加(Alam and Salahuddin, 2016) [15]，这将增加碳排放强度(Dong *et al.*, 2021) [16]。

总之，数字经济对碳排放的影响仍不确定，因此其影响是积极的还是消极的尚不清楚。

3. 理论假设

3.1. 数字经济对碳排放强度的影响

Kuznets 发现，在经济发展水平较低的国家，环境退化会随着经济增长而加剧。然而，在达到特定临界点后，经济发展会导致环境污染减缓。换言之，经济扩张与环境污染之间的关系呈倒“U”形。因此，我们认为碳排放强度与数字经济之间也存在类似的联系。这主要是由于在数字经济发展的早期阶段，基础设施的建立和利用需要大量的能源支持。这反过来又刺激了新型 ICT 设备的采用，鼓励了电力密集型消费模式，并增加了对能源消耗的依赖(Kim *et al.*, 2021, 2021; Kouton, 2019) [17] [18] [19]。此外，数字经济的发展提供了刺激新经济活动的机会，包括数字制造和互联网金融，这可能导致能源使用和碳排放的增加，最终导致碳排放的上升。

在数字经济的成熟阶段，研究人员发现数字化与工业化的融合提高了工业效率。数字技术与制造、

运营和管理的融合,使能源使用量大幅下降。此外,数字经济还能降低交易成本,解决资源错配问题(Ishida, 2015)。数字经济可以降低交易成本,解决资源错配问题。此外,对数字化生产和运营可以推动技术进步,简化结构,从而减少资源和能源的使用。数字经济在促进创新、推动经济转型和促进高质量经济增长方面发挥着至关重要的作用。预计数字经济带来的有利环境效应将不断扩大,逐步缓解碳排放带来的不利影响。基于理论分析,本文提出以下假设:

H1: 数字经济与碳排放强度之间存在倒 U 型非线性相关关系。

3.2. FDI 的调节作用

外国直接投资通常被视为引进先进技术和设备、促进产业结构优化的有效途径。高质量的外国直接投资可以将资金和技术引向高科技产业和环境友好型企业,从而大大减少生产过程中的碳足迹。

在东道国吸引大量外国直接投资(FDI)的情况下,外国直接投资和数字经济对碳排放的影响有相似之处。这表明两者之间存在潜在的替代关系。这种影响主要表现在两个方面。外国直接投资(FDI)可以为各国带来先进的技术和管理经验,提高生产效率,减少碳排放。这是因为先进技术可以帮助企业采用更高效、更环保的生产方式。另一方面,外国直接投资可以促进产业结构优化和企业绿色转型。外资更倾向于将资金投向高附加值产业,政府不断加强引导,使大量资金流入服务业、金融业等第三产业。促使 FDI 通过提高技术水平、促进产业结构优化来促进碳排放的减少。

在外国直接投资流入量低的国家,外国资本往往优先投资于在东道国已有成熟发展基础和盈利潜力的行业。这些行业往往以碳密集型行业为主。由于这些行业的碳密集度较高,外国直接投资可以进一步扩大初始生产规模,提高生产效率。这些外国资金可能会流入高污染、高碳排放的行业。在这种情况下,外国直接投资不仅不能促进可持续发展,还可能加剧碳排放的增加,对全球气候变化产生负面影响。

本文在上述分析的基础上提出了以下假设:

H2: 外国直接投资在碳排放强度与数字经济之间倒 U 型关系中发挥明显的调节作用。

4. 变量处理与模型构建

4.1. 变量描述

1) 核心被解释变量

碳排放强度: 本文使用世界数据银行数据库(WDI)的碳排放量和国民生产总值(GDP)的数据,将碳排放总量相对于 GDP 的比率作为碳排放强度。

2) 解释变量

本文根据现有数据和对数字经济特征的准确描述,参考以往文献确定的指标体系,以及世界经济论坛、国际电信联盟等国际组织发布的数字经济指标,选取了 15 项指标,以互联网发展程度为核心衡量方法,结合数据的可获得性,建立了一个评估框架,见表 1,从国家数字竞争力、数字经济创新环境和数字经济基础设施三个维度来衡量数字经济的发展,为确保客观性并消除人为偏见,我们采用了熵值法计算指标的信息熵。这种方法不需要任何特定的数据分布,可以保留数据集中的所有信息。

3) 调节变量

外国直接投资: 采用世界银行数据库中外国直接投资净流入的现值美元衡量外国直接投资记做 $\ln fdi$ 。

4) 控制变量

城市化水平: 城市化水平是根据城市人口在总人口中的份额来衡量的,记做 urd 。

金融发展水平: 金融自由化和开放是影响二氧化碳排放减少的基本因素(Tamazian *et al.*, 2008) [20]。本文使用国际货币基金组织(IMF)金融发展指数数据库开发的金融发展指数来衡量一个国家的金融发展,

记做 fd 。

Table 1. Table of weights for indicators of the level of development of the national digital economy
表 1. 国家数字经济发展水平指标权重表

一级指标	二级指标	指标权重	数据来源
数字经济基础设施	互联网的个人使用率	2.727%	WDI
	移动蜂窝订阅率	1.84%	WDI
	固定电话的订阅率	6.301%	WDI
	固定宽带的订阅率	7.933%	WDI
	拥有计算机的家庭百分比	4.121%	ITU
	拥有互联网的家庭百分比	3.993%	ITU
	活跃的移动宽带订阅率	6.33%	ITU
数字经济创新环境	服务业就业比率	1.715%	WDI
	受过高等教育的劳动力比率	1.232%	WDI
	政府教育支出总额(占 GDP 的百分比)	2.903%	WDI
	高等教育入学率	4.072%	WDI
国家数字竞争力	科技期刊文章人均拥有量	14.604%	WDI
	高科技产品出口率	10.22%	WDI
	信息和通信技术服务出口率	10.324%	WDI
	信息和通信技术产品出口率	21.685%	WDI

经济增长：经济增长是推动碳排放增长和能源消耗增加的关键因素。我们使用人均国内生产总值来衡量经济增长水平，记做 \lnpgdp 。

产业结构：产业结构调整具有“结构红利”效应，可在促进碳减排方面发挥作用(Sun *et al.*, 2020) [21]。第二产业是高污染产业，不利于减少碳排放。合理化和先进的产业结构可以提高碳排放绩效(Wang *et al.*, 2019) [22]。我们使用该第三产业产值相对于第二产业产值的比率来衡量产业结构的升级，记做 ind 。

能源结构：使用可再生能源消耗相对于一次能源总消耗的比率来衡量能源结构，记做 es 。

政府支出：本文使用政府一般消费支出占 GDP 的份额来衡量政府干预水平，记做 gov 。

人口规模：本文通过该国家或地区的年末人口规模来刻画，记做 \lnpop 。

对外开放水平：本文使用进出口商品和服务总额在国内生产总值中的份额来刻画对外开放水平，记作 trd 。

对部分缺失数值采用插值法补全，并进行描述性统计，表 2 为变量的描述性统计结果。

4.2. 模型构建

4.2.1. 固定效应模型

根据建立的数字经济指标体系，并对样本各国的数字经济水平数值进行了测算。借鉴学术界通用做法，本研究拟采用固定效应模型，首先建立起面板数据的基准回归模型，进而分析研究数字经济水平对碳排放强度的影响。基准回归模型的设定如式(1)所示。

Table 2. Results of variable descriptive statistics
表 2. 变量描述统计结果

变量	样本数	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放强度	700	0.415	0.295	0.0597	1.468
外国直接投资	654	22.41	1.956	17.33	26.96
数字经济水平	700	0.342	0.115	0.0532	0.623
金融发展	700	0.491	0.233	0.0843	0.955
经济增长	700	9.488	1.130	6.663	11.54
产业结构	700	2.457	0.754	0.950	4.292
对外开放水平	700	0.955	0.504	0.228	3.791
城市化水平	700	68.61	16.56	22.78	100
能源结构	700	22.58	16.92	0	81.07
政府支出	700	17.20	4.531	4.807	31.84
人口规模	700	16.49	1.681	12.67	21.07

$$cei_{it} = \beta_0 + \beta_1 dig_{it} + \beta_2 dig_{it}^2 + \beta_3 \ln fdi + \beta_4 fd_{it} + \beta_5 ind_{it} + \beta_6 urd_{it} + \beta_7 es_{it} + \beta_8 \ln pgdp_{it} + \beta_9 gov_{it} + \beta_{10} \ln pop_{it} + \beta_{11} trd_{it} + \beta_{12} \ln wage_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式(1)中 $\beta_1 \sim \beta_{11}$ 表示不同变量的系数。 β_0 表示常数项。 α_i 和 γ_t 分别代表个体固定效应和时间固定效应。 ε 表示随机误差项。

4.2.2. 调节效应模型

经过前文的理论分析, 外国直接投资(FDI)可能会影响数字经济与碳排放的关系, 为探究 FDI 的调节效应, 建立如下模型:

$$cei_{it} = \beta_0 + \beta_1 dig_{it} + \beta_2 dig_{it}^2 + \beta_3 dig_{it} \times \ln fdi_{it} + \beta_4 dig_{it}^2 \times \ln fdi_{it} + \beta_5 \ln fdi_{it} + \beta_6 fd_{it} + \beta_7 ind_{it} + \beta_8 urd_{it} + \beta_9 es_{it} + \beta_{10} \ln pgdp_{it} + \beta_{11} gov_{it} + \beta_{12} \ln pop_{it} + \beta_{13} trd_{it} + \beta_{14} \ln wage_{it} + \alpha_i + \gamma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

式(2)在式(1)的基础上加入了数字经济发展水平与外国直接投资的交互项 $dig_{it} \times \ln fdi_{it}$ 和数字经济发展水平的平方与外国直接投资的交互项 $dig_{it}^2 \times \ln fdi_{it}$, 其余控制变量与式(1)相同。

5. 实证结果

5.1. 数字经济发展水平测算结果

在此前确定的国家数字经济发展水平指标体系的基础上, 计算 70 个国家的数字经济发展水平。我们使用熵值法确定了每个指标的权重, 并根据权重进一步计算得到样本国家的数字经济发展水平, 结果见图 1。

在选定的样本国家中, 新加坡是数字经济水平最高的国家。此外, 韩国、美国和西欧国家的数字经济也比较发达。与发达国家相比, 发展中国家的数字经济水平较低, 网络连接能力弱的国家与数字连接能力强的国家之间的差距在全球范围内日益明显。

5.2. 数字经济对碳排放强度的直接影响分析

为了分析数字经济发展水平对区域碳排放强度的影响, 进行基础回归, 通过检验选取固定效应模型

进行分析，见下表 3。

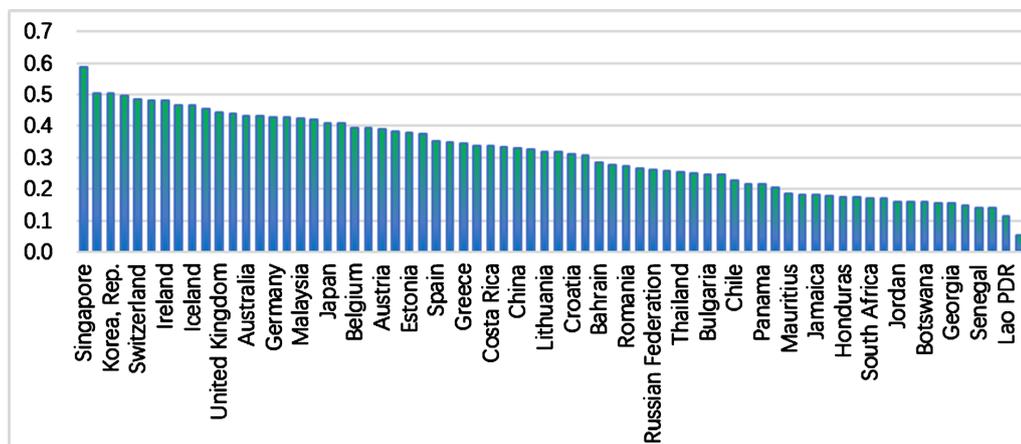


Figure 1. Level of the digital economy by country

图 1. 各国数字经济水平

Table 3. Empirical results on the impact of digital economy development and FDI on carbon emission intensity

表 3. 数字经济发展和外国直接投资对碳排放强度的影响实证结果

	(1) 碳排放强度	(2) 碳排放强度	(3) 碳排放强度
数字经济	3.672*** (1.239)		2.932*** (0.998)
数字经济平方	-5.177*** (1.768)		-3.999*** (1.434)
外国直接投资		0.001 (0.003)	0.003 (0.003)
金融水平		-0.112 (0.238)	-0.264 (0.244)
经济发展		-0.296** (0.089)	-0.313*** (0.073)
产业结构		-0.062*** (0.021)	-0.057** (0.023)
对外开放水平		0.052 (0.041)	0.012 (0.046)
城市化水平		-0.005 (0.009)	-0.005 (0.008)
能源结构		-0.017*** (0.005)	-0.013*** (0.004)
政府支出		0.011 (0.008)	0.007 (0.006)

续表

人口规模		0.021	-0.030
		(0.158)	(0.201)
常数项	-0.109	3.510	4.102
	(0.207)	(2.960)	(3.650)
样本量	700.000	654.000	654.000
R ²	0.238	0.424	0.488
Adj R-squared	0.226	0.408	0.472
F	8.878	7.024	9.660

注：括号内为稳健标准误，***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的水平显著。

表 3 揭示了数字化对碳排放的直接影响。在不考虑其他变量的情况下，数字经济发展水平对碳排放强度有正向显著影响，显著性水平为 1%。相反，数字经济二次项对碳排放强度的负向影响也在 1%的水平上显著。模型(3)引入了控制变量后结果显示，数字经济发展水平及其平方项仍然显著，虽然系数略有不同，但总体方向与模型(1)的结果一致。这凸显了数字经济发展与碳排放强度之间存在着倒 U 型关系，其特点是伴随着数字经济的发展碳排放强度出现先上升后下降的趋势。

为了增强前文所讨论的倒 U 型关系研究结果的稳健性与可信度，我们参照 Lind J T、Mehlum H、Sasabuchi S.等人在相关领域内的研究方法，进行了有针对性的测试。经过计算和分析，发现该拐点出现在数字经济为 0.370 的水平上，这符合该研究方法验证倒 U 型曲线的条件，即检验结果证实存在倒 U 型关系。

本文在刻画两个核心变量之间的倒 U 型关系时，采用了 Aiken 和 West (1991 年)、Dawson (2014 年)以及 Dawson 和 Richter (2006 年)先前研究中的分析程序，见图 2。

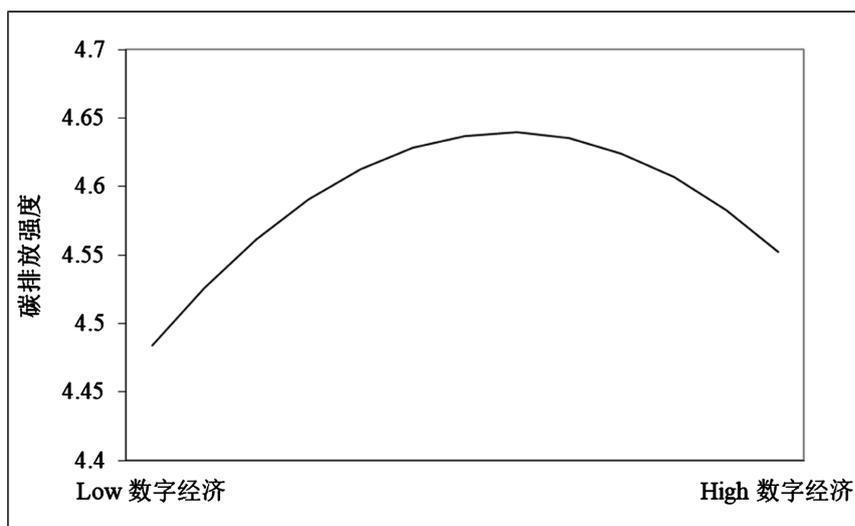


Figure 2. Relationship between the digital economy and carbon intensity
图 2. 数字经济与碳排放强度关系图

透过数据分析和可视化工具，我们可以清晰地观察到一个明显的趋势：当数字经济水平低 0.370 时，会导致碳排放强度上升。然而，一旦数字经济水平超过了这个关键的 0.370 阈值，数字经济开始对碳排

放强度产生抑制作用，碳排放开始减少。初期阶段，数字经济的发展可能伴随着能源密集型产业的增加，从而导致碳排放的上升。然而，随着数字技术的应用和数字化转型的深化，企业和社会可能更加注重能源效率和碳减排，从而实现了数字经济对碳排放的抑制作用。

5.3. 调节效应结果分析

考虑到外国直接投资会对不同的国家或地区产生不同的影响，故利用调节效应模型分析在不同水平的数字经济条件下，外国直接投资对碳排放的影响，实验结果如表 4。

Table 4. Empirical results of moderating effects

表 4. 调节效应实证结果

	(1) 碳排放强度	(2) 碳排放强度
数字经济	2.932 ^{***} (0.998)	23.527 ^{***} (6.988)
数字经济平方	-3.999 ^{***} (1.434)	-32.302 ^{***} (9.427)
数字经济与外国直接投资交互项		-0.960 ^{***} (0.301)
数字经济平方与外国直接投资交互项		1.315 ^{***} (0.401)
外国直接投资	0.003 (0.003)	0.168 ^{**} (0.056)
金融水平	-0.264 (0.244)	-0.267 (0.211)
经济发展	-0.313 ^{***} (0.073)	-0.357 ^{***} (0.066)
产业结构	-0.057 ^{**} (0.023)	-0.044 ^{**} (0.022)
对外开放水平	0.012 (0.046)	0.015 (0.040)
城市化水平	-0.005 (0.008)	-0.004 (0.007)
能源结构	-0.013 ^{***} (0.004)	-0.013 ^{***} (0.003)
政府支出	0.007 (0.006)	0.006 (0.005)
人口规模	-0.030 (0.201)	-0.060 (0.202)
常数项	4.102 (3.650)	1.374 (3.709)

续表

样本量	654.000	654.000
R ²	0.488	0.528
Adj R-squared	0.472	0.512
F	9.660	9.762

注：括号为稳健标准误，***、**和*分别表示在 1%、5%和 10%的水平显著。

从回归结果来看，在引入数字经济与外国直接投资和数字经济平方与外国直接投资的交互项后，外国直接投资、外国直接投资与数字经济和数字经济平方的交互项指数都在 1%的水平上显著，这说明外国直接投资在数字经济与碳排放强度的关系中发挥着显著的调节作用。为进一步明确外国直接投资在两者关系中发挥的调节作用，进行以下步骤的公式运算：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 dig + \beta_2 dig^2 + \beta_3 dig \times \ln fdi + \beta_4 dig^2 \times \ln fdi + \beta_5 \ln fdi \quad (3)$$

$$= \beta_0 + (\beta_1 + \beta_3 \ln fdi) dig + (\beta_2 + \beta_4 \ln fdi) dig^2 + \beta_5 \ln fdi$$

$$C = \frac{d^2 Y}{d(dig)^2} = 2(\beta_2 + \beta_4 \ln fdi) \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \ln fdi} = 2\beta_4 \quad (5)$$

$$IF = \frac{\beta_1 + \beta_3 fd}{2(\beta_2 + \beta_4 fd)} \quad (6)$$

$$\frac{\partial IF}{\partial \ln fdi} = \frac{\beta_1 \beta_4 - \beta_2 \beta_3}{2(\beta_2 + \beta_4 \ln fdi)^2} \quad (7)$$

首先分析外国直接投资对曲线形态的影响。文中的研究模型是关于数字经济发展水平的二次函数，省略控制变量后的倒 U 型曲线回归的调节效应模型为公式(3)。二次函数曲线的形态是平缓还是陡峭由其顶点的曲率决定，顶点曲率 C 等于二次函数的二阶导数，见公式(4)。对于倒 U 型曲线来说， C 小于 0，且 C 越小曲线越陡峭， C 越大曲线越平缓。外国直接投资对曲线形状的影响可以通过计算 C 关于 $\ln fdi$ 的偏导数来确定，如式(5)所示。经公式推导运算后发现，外国直接投资对曲线形状的影响主要由 β_4 的正负决定，模型 2 表明，数字经济的平方与外国直接投资的交互项系数为正，即这种影响导致曲线形状更加平缓。

其次，考虑外国直接投资对曲线拐点的影响。二次函数曲线的拐点表达式为公式(6)，用其对外国直接投资 $\ln fdi$ 求偏导，即可分析外国直接投资对曲线拐点的影响，见公式(7)。公式(7)分母大于 0，则外国直接投资对拐点的影响主要取决于分子 $\beta_1 \beta_4 - \beta_2 \beta_3$ ，回归 4 中 β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 均显著，代入系数大小计算 $\beta_1 \beta_4 - \beta_2 \beta_3$ 的值为 -0.0719， $\beta_1 \beta_4 - \beta_2 \beta_3$ 小于 0，说明外国直接投资会使数字经济与碳排放强度的关系拐点左移。

为了更直观地表现外国过直接投资的调节效应，采用前文使用的图像绘制工具，依据回归结果绘制了图 3，由此看出，相比外国直接投资低的国家和地区，高外国直接投资的国家倒 U 型曲线更加平缓，且拐点左移。这一观察结果进一步验证了外国直接投资在提升数字经济减碳能力方面的重要调节作用。

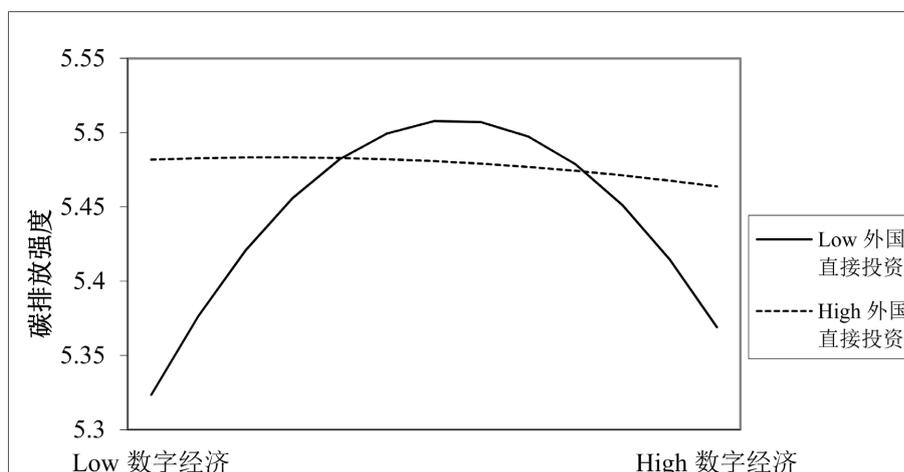


Figure 3. Diagram of the moderating effect
图 3. 调节效应图

6. 结论与政策意见

6.1. 结论

研究选取了全球 70 个主要国家作为样本，使用了 2010 年至 2019 年的面板数据。分析了样本国家的评价指标体系和数字经济发展水平，计算了各国数字经济发展的总体水平。研究证实了数字经济对碳强度存在“倒 U 型”效应。此外，研究还探讨了外国直接投资对两个核心变量之间关系的调节作用。主要研究结果如下：

首先，研究结果表明，数字经济在全球范围内不断发展，但技术先进的发达国家与产业结构不发达的发展中国家之间存在明显差距，导致数字鸿沟显著。

其次，通过对覆盖 70 个国家和地区的广泛数据集进行深入分析，我们发现两个核心变量之间存在显著的非线性倒 U 型关系。在数字经济不发达的地区，由于缺乏必要的基础设施、技术支持和有效的监管框架，数字技术的快速扩张，尤其是在发展初期，可能会导致能源消耗的增加和碳强度的上升。然而，随着数字经济的成熟，这种情况开始发生变化。一旦数字经济达到一定的成熟度，其效率的提高和创新开始超过其能源消耗，从而减少碳排放。

最后，在分析外国直接投资的调节作用时，发现在不同的外国直接投资流入水平和不同的国家或地区背景下，外国直接投资对数字经济与碳排放强度之间关系的影响存在显著差异。在外国直接投资流入量低的国家和地区，外国直接投资对数字经济与碳排放强度之间关系的影响并不明显。在外国直接投资流入量大的国家和地区，外国直接投资对数字经济与碳排放强度之间关系的影响显著，使二者之间的关系趋于平缓。此外，在外国直接投资流入较多的国家和地区，数字经济发展水平可以更快地达到碳减排的转折点。

6.2. 政策建议

第一，各国政府应加大对数字基础设施的投资，提高数字工具的普及率。通过加强网络覆盖、建设数据中心和云计算平台等基础设施，可以促进数字技术的广泛应用。这不仅可以提高生产率、降低能耗，还有助于推动经济的低碳转型。通过数字化转型，企业可以实现生产过程的智能化和自动化，提高资源利用效率，降低能耗和碳排放。同时，政府可以出台相关政策，提供税收减免、贷款支持等激励措施，鼓励企业进行数字化升级改造。此外，政府还应重视可再生能源的发展，利用数字化技术提高可再生能

源的利用效率，减少对化石能源的依赖，进一步减少碳排放。总之，通过加强基础设施建设、鼓励企业数字化、发展可再生能源、促进数字扫盲等措施，可以加快数字经济的发展，发挥其绿色减排的潜力。这将有助于经济增长与能源消耗脱钩，促进向低碳经济转型，为全球应对气候变化做出积极贡献。

第二，建议采取措施引导外国直接投资流向绿色投资，支持低碳经济的发展。可以通过提供税收优惠和减少监管壁垒来吸引外国直接投资进入绿色投资领域，减少繁琐的手续和审批，降低外国投资者的运营成本。各国政府可以制定与可再生能源、清洁技术和环保领域相关的投资促进政策，鼓励外国投资者投资这些领域。通过这些政策，可以吸引更多的外国直接投资流入绿色产业，促进经济的低碳转型。建立明确的环境保护法规和政策框架，确保外国直接投资对环境友好。这些法规应涵盖碳排放、废物处理和资源管理等问题，并要求投资者采取有效措施，最大限度地减少对环境的负面影响。还应建立监测和报告机制，跟踪外国直接投资对数字经济和环境的影响，以便及时采取行动纠正不当行为。总之，通过税收激励、监管改革、投资促进政策和环境保护法规等综合措施，可以吸引更多的外国直接投资进入可再生能源、清洁技术和环保产业等领域。这将有助于促进经济的低碳转型，实现经济增长与环境保护的平衡发展。

参考文献

- [1] Yu, B., Fang, D., Kleit, A.N. and Kun, S. (2022) Exploring the Driving Mechanism and the Evolution of the Low-Carbon Economy Transition: Lessons from OECD Developed Countries. *The World Economy*, **45**, 2766-2795. <https://doi.org/10.1111/twec.13263>
- [2] United Nations Climate Change (2021) United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC).
- [3] Ishida, H. (2015) The Effect of ICT Development on Economic Growth and Energy Consumption in Japan. *Telematics and Informatics*, **32**, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.04.003>
- [4] Wu, H., Hao, Y., Ren, S., Yang, X. and Xie, G. (2021) Does Internet Development Improve Green Total Factor Energy Efficiency? Evidence from China. *Energy Policy*, **153**, Article ID: 112247. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112247>
- [5] Wu, H., Xue, Y., Hao, Y. and Ren, S. (2021) How Does Internet Development Affect Energy-Saving and Emission Reduction? Evidence from China. *Energy Economics*, **103**, Article ID: 105577. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105577>
- [6] Azam, A., Rafiq, M., Shafique, M. and Yuan, J. (2021) An Empirical Analysis of the Non-Linear Effects of Natural Gas, Nuclear Energy, Renewable Energy and ICT-Trade in Leading CO₂ Emitter Countries: Policy towards CO₂ Mitigation and Economic Sustainability. *Journal of Environmental Management*, **286**, Article ID: 112232. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112232>
- [7] Ren, S., Hao, Y., Xu, L., Wu, H. and Ba, N. (2021) Digitalization and Energy: How Does Internet Development Affect China's Energy Consumption? *Energy Economics*, **98**, Article ID: 105220. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105220>
- [8] Kwon, O., Lee, N. and Shin, B., (2014) Data Quality Management, Data Usage Experience and Acquisition Intention of Big Data Analytics. *International Journal of Information Management*, **34**, 387-394. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.02.002>
- [9] Shin, D.H. and Choi, M.J. (2015) Ecological Views of Big Data: Perspectives and Issues. *Telematics and Informatics*, **32**, 311-320. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2014.09.006>
- [10] Hampton, S.E., Strasser, C.A., Tewksbury, J.J., Gram, W.K., Budden, A.E., Batcheller, A.L., Duke, C.S. and Porter, J.H. (2013) Big Data and the Future of Ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, **11**, 156-162. <https://doi.org/10.1890/120103>
- [11] Dong, F., Li, Y., Qin, C., Zhang, X., Chen, Y., Zhao, X. and Wang, C. (2022) Information Infrastructure and Greenhouse Gas Emission Performance in Urban China: A Difference-In-Differences Analysis. *Journal of Environmental Management*, **316**, Article ID: 115252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115252>
- [12] Dong, F., Li, Y., Gao, Y., Zhu, J., Qin, C. and Zhang, X. (2022) Energy Transition and Carbon Neutrality: Exploring the Non-Linear Impact of Renewable Energy Development on Carbon Emission Efficiency in Developed Countries. *Resources, Conservation and Recycling*, **177**, Article ID: 106002. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.106002>
- [13] Wang, J., Dong, X. and Dong, K. (2022) How Does ICT Agglomeration Affect Carbon Emissions? The Case of

- Yangtze River Delta Urban Agglomeration in China. *Energy Economics*, **111**, Article ID: 106107. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022.106107>
- [14] Jin, X. and Yu, W. (2022) Information and Communication Technology and Carbon Emissions in China: The Rebound Effect of Energy Intensive Industry. *Sustainable Production and Consumption*, **32**, 731-742. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.004>
- [15] Salahuddin, M. and Alam, K. (2016) Information and Communication Technology, Electricity Consumption and Economic Growth in OECD Countries: A Panel Data Analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **76**, 185-193. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.11.005>
- [16] Dong, F., Pan, Y., Li, Y. and Zhang, S. (2021) How Public and Government Matter in Industrial Pollution Mitigation Performance: Evidence from China. *Journal of Cleaner Production*, **306**, Article ID: 127099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127099>
- [17] Kim, K., Bounfour, A., Nonnis, A. and Özaygen, A. (2021) Measuring ICT Externalities and Their Contribution to Productivity: A Bilateral Trade Based Approach. *Telecommunications Policy*, **45**, Article ID: 102085. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102085>
- [18] Kim, J., Park, J.C. and Komarek, T. (2021) The Impact of Mobile ICT on National Productivity in Developed and Developing Countries. *Information & Management*, **58**, Article ID: 103442. <https://doi.org/10.1016/j.im.2021.103442>
- [19] Kouton, J. (2019) Information Communication Technology Development and Energy Demand in African Countries. *Energy*, **189**, Article ID: 116192. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116192>
- [20] Tamazian, A., Chousa, J.P. and Vadlamannati, K.C. (2008) Does Higher Economic and Financial Development Lead to Environmental Degradation: Evidence from BRIC Countries. *Energy Policy*, **37**, 246-253. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.08.025>
- [21] Sun, Y. and Bailey, R. (2020) Effect of Applied Cathodic Potential on Friction and Wear Behavior of CoCrMo Alloy in NaCl Solution. *Lubricants*, **8**, Article 101. <https://doi.org/10.3390/lubricants8110101>
- [22] Wang, K., Wu, M., Sun, Y., Shi, X., Sun, A. and Zhang, P. (2019) Resource Abundance, Industrial Structure, and Regional Carbon Emissions Efficiency in China. *Resources Policy*, **60**, 203-214. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.001>