

产业数字化与完全碳排放强度

——基于WIOD跨国面板的实证分析

武亚楠^{1,2}, 彭璧玉²

(1.广州商学院 经济学院, 广州 511363; 2.华南师范大学 经济与管理学院, 广州 510006)

摘要: 现有研究多侧重于分析数字经济对区域碳排放总量、强度和效率的影响, 鲜有文献探究产业数字化对其完全碳排放强度的影响。为弥补现有研究不足并丰富相关研究, 本文基于WIOD、WDI跨国面板数据实证分析产业数字化与其完全碳排放强度之间的因果关系。研究发现: ①产业数字化能降低其完全碳排放强度, 该结论在替换解释和被解释变量、增加控制变量及考虑内生性等稳健性检验后依然成立; ②产业数字化通过减少中间投入进而降低了完全碳排放总量和强度, 促进了产业增长与碳排放的脱钩; ③数字化能降低整体农业, 种植业和畜牧业, 林业, 制造业, 整体交通运输业, 陆路和管道运输, 空运, 仓储和运输支持活动, 邮政和信使活动及采矿业, 北美和欧洲国家, 发达经济体的完全碳排放强度。但对渔业, 水运, 水业, 建筑业, 住宿和餐饮业, 东亚国家和不发达经济体的行业完全碳排放强度没有显著影响。同时, 在高数字化行业中, 数字化对其完全碳排放强度具有显著的抑制作用。

关键词: 产业数字化; 完全碳排放强度; 投入产出表

中图分类号: F13/17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—980X(2023)10—0105—10

2023年4月世界气象组织(WMO)发布《2022年全球气候状况》。该报告指出, 吸热温室气体达到创纪录水平。自20世纪90年代初以来, 海平面整体已上升了超过10厘米。因此, 治理二氧化碳排放等温室气体刻不容缓。作为负责任的大国, 中国关于应对气候变化、降低碳排放的国家自主贡献不断加码, 适时提出碳达峰、碳中和愿景, 印发《2030年前碳达峰行动方案(国发[2021]23号)》, 以此为减少温室气体排放、应对气候危机做出中国贡献。中国主动减少碳排放的责任和担当能为国际社会树立典范, 激励全球气候行动, 体现中国主动承担人类命运共同体的担当。在此背景下, 如何治理碳排放已成为当前我国生态文明建设、实现经济高质量发展、贯彻新发展理念, 实现社会主义现代化强国的重要问题。数字经济代表了一种新的发展方式, 在促进可持续、零碳和包容性经济增长方面的潜在作用值得探索。目前, 学者们对数字经济对与区域碳排放总量、强度及效率之间的关系进行了深入的探讨并取得了较为丰富的成果。少数文献分析了区域特征对具体产业或行业碳排放的影响。但鲜有研究探讨产业数字化对产业碳排放的关系。探讨产业数字化和产业碳排放之间的因果关系有助于了解不同产业数字化和产业碳排放情况, 可以帮助政府和决策者制定更具有针对性和有效性的政策, 以减缓气候变化和改善环境。鉴于产业或行业数字化产出较难衡量, 故本文用产业数字化投入衡量产业和行业数字化, 并利用世界投入产出数据库(world input-output database, WIOD)、世界发展指标(world development indicators, WDI)等跨国面板数据实证分析产业数字化与其完全碳排放强度之间的因果关系。基于此, 本文拟研究的问题是: 产业数字化是否抑制产业完全碳排放强度? 如是, 其可能的中介机制是什么? 异质性又有哪些? 以上问题的研究可以为碳达峰和碳中和的实现提供产业层面的启示。

一、文献回顾

与本文相关的文献主要有三个方面: 一是, 数字经济对碳排放的影响; 二是, 产业碳排放的影响因素; 三是, 产业数字化对具体产业或行业碳排放的影响。学术界主要从三个视角探讨数字经济对碳排放的影响: 第一, 数字经济不仅能降低碳排放总量、强度, 还能提升碳排放效率。学者们认为数字经济降低碳排放的路径主要有: 经济增长、金融发展和产业结构升级(Dong et al, 2022), 能源结构(Yi et al, 2022), 煤炭消费比重、绿色技术创新水平(Wang et al, 2022), 环境治理(Zhang et al, 2022), 创新要素流动性(Wang et al, 2022), 碳全要素生产率(Han et al, 2022)等。第二, 数字经济增加了碳排放。主要原因是: 数字产业扩大了能源需求

收稿日期: 2023-05-16

作者简介: 武亚楠, 广州商学院经济学院专任教师, 华南师范大学经济与管理学院博士研究生, 研究方向: 数字经济、数字金融、资源环境经济与政策; 彭璧玉, 博士, 华南师范大学经济与管理学院院长, 教授, 研究方向: 数字经济、数字金融、能源经济、产业经济、资源环境经济与政策。

(Jin and Yu, 2022)、增加了非信息通讯技术部门的碳密集型中间投入(Zhou et al, 2019)、增加了区域电力和能源的消耗(Salahuddin et al, 2016)。也有学者认为数字经济的发展不利于提高能源效率,从而间接增加了碳排放(Zhang et al, 2022)。第三,也少数文献认为数字经济与碳排放呈现非线性影响(Zhang et al, 2022)(Cheng et al, 2023)。

从产业碳排放的影响因素角度看,现有学者认为人口、土地和经济城镇化促进了本地交通运输业的碳排放总量(田泽等, 2023);全球价值链生产长度的延长能产生显著的减排效果(赵凌云和杨来科, 2020)。研发、外国直接投资水平溢出和外国直接投资前向溢出三种来源的技术进步可降低整体产业碳强度(杨传明, 2019)。但从产业数字化角度探讨其对产业碳排放影响的文献较少。

从产业数字化与产业碳排放关系的角度看,这类研究多数侧重于理论层面。研究发现,出租车客运行业和货运行业利用大数据能优化城市交通,提高供需匹配效率,减少空驶(许宪春等, 2019)。同时,共享乘车直接降低了汽车能耗,并通过铁、钢、塑料、水泥需求下降来间接减少能源消耗,进而降低碳排放(Akimoto et al, 2022)。信息产业通过路线优化、容量分配和物联网等技术,显著降低了物流业的碳排放强度(Prajogo and Olhager, 2012)。信息产业技术溢出通过五大路径即生产过程模拟,产品和服务的智能设计和操作,智能物流配送,大数据匹配买卖双方,远程办公方式实现跨行业减排(Wang et al, 2021)。少数实证研究认为工业智能化发展能够通过技术进步和抑制能源强度提升工业碳排放效率(王艳秋和陶思佳, 2023)。

现有文献为本文提供了有益借鉴。但在以下方面可以进一步拓展:第一,如前所述,尽管已有研究从区域角度探究数字经济与碳排放之间的关系,但大多忽视了产业或行业视角。第二,现有文献主要从城镇化、价值链和技术进步角度对具体产业碳排放总量、强度的影响,却忽视了产业数字化对产业碳排放的影响。第三,现有对产业数字化与产业碳排放关系的研究主要为定性研究,定量研究较少。且部分定量研究仍未从产业或行业数字化角度分析其对碳排放强度的影响。第四,少数使用行业数字化投入的文献使用的是中国投入产出数据(杨丹辉和胡雨朦, 2022),但中国投入产出表存在年份不连续,数据量较少的弊端。鉴于产业和行业数字化产出较难衡量,故本文采用产业数字化投入衡量产业数字化。基于此,本文从产业数字化与碳排放强度的视角出发,利用WIOD的投入产出表、环境账户数据及WDI相关数据,在测算产业数字化和产业碳排放强度的基础上,研究产业数字化与碳排放强度的关系,中介机制及异质性。

本文的边际贡献可能在于:①研究层面为产业层,探究产业数字化与碳排放强度的文献较少。故本文测度产业数字化并分析产业数字化对其完全碳排放强度的影响,该选题具有一定的新颖性,能丰富现有研究。②从定量角度,建立跨国分行业面板模型评估产业数字化对产业完全碳排放强度的影响。这种跨国数据结构能提供更多产业数字化和碳排放的信息,使得评估结果更加可靠。③分析产业数字化对不同行业、不同经济体、不同区位产业或行业碳排放强度的影响,并探讨不同产业数字化对产业或行业碳排放强度的影响。由此,进行多角度的异质性分析,使结论和建议更加具有针对性。

二、理论分析与研究假说

本文从产业链和产业调控的角度探讨产业数字化对产业碳排放强度的影响。产业链包含供需链、企业链、空间链和价值链。首先,产业数字化改造供需链,减少产业中间投入,提高产业效率,降低了产业碳排放。供需链包含消费者和生产者的需求链,物流链和生产要素的供应链,产品技术链和技术服务链(吴金明和邵昶, 2006)。第一,产业数字化有利于利用大数据模型和算法精准预测市场需求的动态趋势和变动规律,促进了决策的高效和生产的精准化,促进供需匹配的效率。第二,物流的数字化促进了智慧物流的发展,进而促进了物流系统中各方参与者信息交互与共享,智能决策与执行,高质量、高效率、低成本地分工协作(李佳, 2019)。第三,产业数字化不仅能提升企业的技术创新(王桂军等, 2022),还可以利用大数据等实现产业内企业、产业间企业的集成创新和协作创新。绿色创新是创新的重要组成部分。因此,从供需链角度来看,产业数字化通过精准化生产和销售,高效率和高质量的运输,技术创新和协作创新降低产业碳排放强度。

其次,产业数字化通过改造企业链,降低产业碳排放。一方面,碳排放量高的企业面临的控制越高,盈利能力较低(Homroy, 2023),信用评级就越低,现金流不确定性越高(Safiullah et al, 2021)。大部分消费者热衷于为环保产品和服务支付更高的价格(Safiullah et al, 2022)。因此,企业可以通过利用环境机会作为先行者来提高其经济效益。而这种注重减排的企业文化、思想将会顺着企业链传导到其他企业中。产业数字化加快了企业链中和企业链间企业与企业,企业与消费者,企业与政府的沟通、联系和互动,使得信息、资金、物质、技术及减排的共识在企业链上流通的更加顺畅,使得企业通过减少碳排放总量的形式降低了碳排放强度。另一方面,

产业数字化对产业增长产生了放大、叠加和倍增效应,使产业通过增加产出的形式降低了碳排放强度。

然后,空间链是同一产业在不同区域的分布。数字经济的发展能降低信息搜寻成本,减少信息不对称,削弱了土地、劳动力等传统区位因素对产业或企业的区位选择的重要性,促进了企业链条的网络空间虚拟集聚(邢丁和徐康宁),促使产业的空间链得到迅速扩展,促进了产业的资源配置。而资源的优化配置是减少碳排放的主要渠道(Wang et al, 2021)。除此之外,价值链是供需链、企业链、空间链的动力。产业数字化通过赋能传统产业能提升传统产业的价值创造、增值,提升企业所处价值链的位置,使产业通过增加产出的形式降低产业碳排放强度。

最后,基于产业调控视角。一是,企业具有减排的内在需求(Homroy, 2023),而产业数字化为产业减排提供了技术支持;二是,产业数字化不仅促进了高耗能和高污染行业的集约化生产,降低了碳排放总量,还促进了绿色、环保产业的发展和科技创新,调整行业或市场结构向绿色、低碳化迈进;三是,产业数字化使得产业链条中的各个主体关系均能成为碳排放治理体系中的重要参与者,声誉机制、协同治理机制在治理产业碳排放过程中能发挥着重要作用。因此,产业数字化扩充了监管主体、监管方式和监管情景,有助于构建多元化主体的协同绿色治理框架,使产业通过促进绿色治理创新,降低了碳排放强度。

综上所述,本文提出假设1:

产业数字化降低了产业完全碳排放强度。

三、实证模型设计与数据处理

(一)模型设定

根据前述理论分析,为探讨产业数字化与其完全碳排放强度的关系,本文设定如式(1)的线性回归模型。

$$carbon_{cit} = \alpha_0 + \alpha_1 digit_{cit} + \sum \alpha X_{cit} + u_c + v_i + \mu_t + \varepsilon_{cit} \quad (1)$$

其中: c 为国家; i 为行业; t 为年份; $carbon_{cit}$ 为被解释变量,即 c 国 i 行业 t 年的完全碳排放强度; $digit_{cit}$ 为 c 国 i 行业 t 年的产业数字化; X 为一系列控制变量; u_c 为国家效应; v_i 为行业效应; μ_t 为年份效应; ε_{cit} 为随机扰动项。为保证结果的可靠性,本文控制国家、行业和年份固定效应,并采用稳健标准误,以缓解潜在的国家、行业与宏观经济因素对估计结果的扰动。

(二)变量选取

1. 被解释变量:碳排放强度

本文借鉴现有文献(黄玉霞和谢建国, 2019)的方法,根据世界投入产出模型测度各国各行业的完全碳排放强度。

首先,测度各国各行的碳排放总量。式(2)中 T^w 、 T^g 为世界和国家 g 的碳排放总量,即 $T^w = \sum_{g=1}^G T^g$; T_i^g 为国家 g 中行业 i 的碳排放总量,则 $T^g = \sum_{i=1}^I T_i^g$; X_i^g 为国家 g 中行业 i 的总产出; $d_i^g = \frac{T_i^g}{X_i^g}$ 为国家 g 中行业 i 的碳排放系数(直接碳排放强度),则 $T^g = \sum_{i=1}^I \frac{T_i^g}{X_i^g} X_i^g$; $d^g = (d_1^g, d_2^g, \dots, d_I^g)$ 和 $X^g = [X_1^g, X_2^g, \dots, X_I^g]^T$ 分别过国家 g 的碳排放系数矩阵和总产出矩阵; $D = (d^1, d^2, \dots, d^G)$ 为各经济体的碳排放系数行向量; $X^w = [X^1, X^2, \dots, X^G]^T$, $Y^w = [Y^1, Y^2, \dots, Y^G]^T$ 分别为各经济体的总产出和最终需求。因此,可得:

$$\begin{aligned} T^w &= \sum_{g=1}^G T^g = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I T_i^g = \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I \frac{T_i^g}{X_i^g} X_i^g = \sum_{g=1}^G (d_1^g, d_2^g, \dots, d_I^g) \begin{bmatrix} X_1^g \\ X_2^g \\ \vdots \\ X_I^g \end{bmatrix} \\ &= \sum_{g=1}^G d^g X^g = (d^1, d^2, \dots, d^G) \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} = DX^w \end{aligned} \quad (2)$$

然后,矩阵 A 为直接消耗系数矩阵, A^{gi} 为行业 i 对行业 g 的直接消耗系数。根据世界投入产出表可知:

$$X^W = \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ \vdots \\ Y^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1G} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2G} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{G1} & A^{G2} & \dots & A^{GG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^1 \\ X^2 \\ \vdots \\ X^G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ \vdots \\ Y^G \end{bmatrix} = AX^W + Y^W \tag{3}$$

$$\Rightarrow X^W = (I - A)^{-1}Y^W \tag{4}$$

因此,可知 $T^W = D(I - A)^{-1}Y^W$, 各经济体的最终产出的碳排放强度 $Carbon^W$ 为: $Carbon^W = D(I - A)^{-1}Y^W = DL = \left(\sum_{g=1}^G d^g l^g \right)_{1 \times G}$ 。其中, I^W 为单位矩阵; L 为列昂惕夫逆矩阵; d^g 为国家 g 的碳排放系数矩阵; l^g 为国家 g 中各个行业间的完全消耗系数; $\sum_{g=1}^G d^g l^g$ 为经济体各行业的单位最终产出的完全碳排放强度。

2. 核心解释变量: 产业数字化

鉴于产业或行业数字化产出较难衡量, 本文参考现有文献(谢靖和王少红, 2022)的方法, 采用产业数字化投入衡量产业数字化(*digit*), 即通过衡量某行业中消耗数字行业产品的价值来测度。产业数字化可以用直接消耗系数、完全消耗系数、直接依赖度与完全依赖度进行衡量。直接消耗系数是某行业一单位产出直接消耗的数字中间产品价值。完全消耗系数是某行业对数字中间产品的直接消耗与所有间接消耗之和。直接消耗系数和完全消耗系数是绝对指标, 难以反映产业数字化投入在总投入中的重要程度(谢靖和王少红, 2022)。直接依赖度是行业对数字行业的直接消耗占该行业所有直接消耗的比重。完全依赖度是行业对数字行业的直接消耗和完全消耗之和占该行业所有完全消耗的比重。鉴于完全依赖度能较为全面的衡量行业对数字行业的消耗和使用情况, 本文使用完全依赖度测度产业数字化。所选择的产业或行业及数字产业是根据《国际标准行业分类》(ISICRev4.0)为依据, 逐一进行筛选(行业及国家分类见表1)。为避免极端值的影响, 本文对核心解释变量进行了1%的缩尾处理。

表1 行业及国家分类

类别	划分
数字行业	C26: 计算机、电子和光学产品的制造; J61: 电信; J62~J63: 计算机编程、咨询和相关活动; 信息服务活动
农业	A01: 作物和动物生产、狩猎及相关服务活动; A02: 林业和伐木; A03: 渔业和水产养殖
制造业	非污染密集型产业 C10~C12: 食品、饮料和烟草制品的制造; C13~C15: 纺织品、服装和皮革制品的制造; C16: 木材及木材和软木制品(家具除外)的制造; 稻草和编织材料制品的制造; C18: 记录媒体的打印和复制; C21: 基本药品和药物制剂的制造; C26: 计算机、电子和光学产品的制造; C27: 电气设备制造; C28: 机械和设备制造, 不另作说明; C29: 汽车、挂车和半挂车的制造; C30: 其他运输设备的制造; C31~C32: 家具制造; 其他制造业; C33: 机械和设备的维修和安装
	污染密集型产业 C17: 纸和纸制品的制造; C19: 焦炭和精炼石油产品的制造; C20: 化学品和化学产品的制造; C22: 橡胶和塑料制品的制造; C23: 其他非金属材料产品的制造; C24: 基本金属的制造; C25: 制造金属制品, 机械和设备除外
交通运输业	H49: 陆路运输和管道运输; H50: 水运; H51: 空运; H52: 仓储和运输支持活动; H53: 邮政和信使活动
采矿业	B: 采矿和采石
水业	E36: 水的收集、处理和供应; E37~E39: 污水处理废物收集、处理和处置活动; 材料回收; 补救活动和其他废物管理服务
建筑业	F: 建设
住宿和餐饮业	I: 住宿和餐饮服务活动

3. 控制变量

选择的控制变量为: ①行业增加值(*lnva*)。为避免回归模型的异方差性, 对其取对数。②能源结构(*es*)。本文使用行业清洁能源消费占行业总能源消费的比重, 其中清洁能源包含生物柴油、生物汽油、沼气、天然气、地热、水力、核能、风能、太阳能等可再生能源。③能源系数(*energy*)。用各行业单位产值的能源消耗量进行衡量。④国家城镇化率(*urban*)。用城市人口占总人口的比重进行衡量。⑤固定资本形成总额(*fix_capital*)。本文用总固定资本形成总额占国内生产总值的比重进行衡量。⑥颗粒物排放损害(*damage*)。本文使用调整后的颗粒物排放损害占国民总收入的比重进行衡量。

4. 数据来源

本文根据 WIOD 的投入产出表测算产业数字化, 并根据 WIOD 环境账户测算完全碳排放强度, 能源数据来源于 WIOD 能源使用数据, 其他控制变量来源为 WDI 数据库。本文于 2023 年 3 月下载的 WIOD 投入产出数据为 2000—2014 年, 有 43 个国家和 rest of the world (ROW); WIOD 环境账户数据为 2000—2016 年数据, 有

42个国家和ROW；WDI数据为2000—2014年数据，有43个经济体。本文采用2000—2014年三个数据库共有的40个国家56个细分行业的数据进行分析和研究。

四、实证结果与分析

(一) 基准回归结果

根据模型设定，产业数字化对产业完全碳排放强度影响的基准回归结果见表2。其中，(1)列为不加任何控制变量时的结果，产业数字化的系数为-145.779并在1%统计水平上显著。(2)~(6)列是逐步加入控制变量时的基准回归结果。(6)列中产业数字化的回归系数为-1.258，且在1%显著性水平下显著。该结果表明产业数字化与产业完全碳排放强度呈现负相关关系，表明产业数字化抑制了其完全碳排放强度。由此验证假设1成立。

表2 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>
<i>digit</i>	-145.779***(-4.917)	-1.068***(-6.732)	-1.111***(-6.902)	-1.235***(-8.067)	-1.241***(-8.058)	-1.258***(-8.073)
<i>lnva</i>		-0.149***(-5.953)	-0.147***(-5.754)	-0.053***(-2.610)	-0.053***(-2.613)	-0.035*(-1.658)
<i>es</i>			-0.318***(-5.574)	-0.366***(-6.714)	-0.367***(-6.732)	-0.363***(-6.713)
<i>energy</i>				0.004***(4.678)	0.004***(4.678)	0.004***(4.713)
<i>urban</i>					0.010(1.539)	0.038***(5.951)
<i>fix_capital</i>						-0.027***(-8.324)
<i>damage</i>						1.697***(6.144)
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	19.506***(5.366)	2.014***(9.942)	2.072***(9.963)	1.300***(7.949)	0.590(1.370)	-1.232***(-2.675)
<i>N</i>	33600	31726	31493	31493	31493	31163
<i>r2_a</i>	0.0489	0.3663	0.3666	0.4568	0.4569	0.4589

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著；括号里面内容表示*t*统计量。

(二) 稳健性检验

1. 替换被解释变量

本文用直接碳排放强度(*co2_d*)和产业碳排放脱钩(*tapio*)作为被解释变量的替代指标，进行稳健性检验。直接碳排放强度是单位产出中国家*g*行业*i*的碳排放总量，衡量的是行业单位产出的直接碳排放量。表3的(1)列展示，产业数字化的系数是-0.719，在1%的显著性水平上显著。研究发现，与基准回归相比，该系数的绝对值小于完全碳排放强度作为被解释变量时的产业数字化的系数绝对值。本文认为产业数字化不仅对本产业的碳排放强度产生直接影响，还能通过产业关联对本产业的碳排放强度产生间接影响。因此，用直接碳排放强度作为被解释变量将会低估产业数字化对产业碳排放强度的抑制作用。该结果表明替换被解释变量后，基准回归的结论依然稳健。

表3 稳健性检验

变量	替换被解释变量		替换解释变量	增加控制变量	交互固定效应
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	<i>co2_d</i>	<i>tapio</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>	<i>carbon</i>
<i>digit</i>	-0.719***(-5.076)	-0.276**(-1.974)		-0.463***(-3.138)	-1.094***(-4.900)
<i>digit_r</i>			-0.690***(-8.069)		
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-0.892**(-2.440)	-0.010(-0.037)	-1.273***(-2.760)	-0.902(-0.454)	0.811***(11.45)
<i>N</i>	31163	30791	31163	4826	31163
<i>r2_a</i>	0.3802	0.2298	0.4589	0.6238	

注：*、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著；括号里面内容表示*t*统计量。

碳脱钩能有效衡量以更低的碳排放换来同样甚至更快经济增长的过程，被广泛应用于：测算区域(韩梦瑶等，2021；王杰等，2021)、行业(袁伟彦等，2022)、企业(米明金程和赵忠秀，2022)碳排放脱钩程度、影响因素和时空特征以探索有效的减排路径。碳排放强度指相对于单位GDP所需二氧化碳的排放量。由于碳脱钩和碳强度均是衡量经济增长和碳排放之间的关系。因此，本文使用碳排放脱钩作为被解释变量进行稳健性检验。本文根据Tapio(2005)脱钩指标体系构建碳排放脱钩指标，步骤为

$$T_{cit} = \frac{\Delta c_{cit}/c_{ci,t-1}}{\Delta tot_{cit}/tot_{ci,t-1}} = \frac{(CO_{2\ cit} - CO_{2\ ci,t-1})/CO_{2\ ci,t-1}}{(tot_{cit} - tot_{ci,t-1})/tot_{ci,t-1}} \quad (5)$$

其中： c 为国家； i 为行业； t 为年份； tot 为行业总产出、 CO_2 为行业隐含碳排放量。该指数衡量了产业和行业碳排放的弹性，较好捕捉了产业和行业经济增长和减排的相对动态。按照 Tapio 的定义，碳脱钩状态可以分为增长强脱钩、增长弱脱钩、衰退强脱钩、衰退弱脱钩、增长不脱钩、衰退不脱钩、增长联结、衰退联结。在产业和行业脱钩类型中，经济增长率为正则是增长型脱钩，反之为衰退型脱钩。在增长型脱钩中，经济增长速度一定时，碳排放增长幅度越小则表明产业和行业脱钩状态越理想。在衰退型脱钩，经济增长减少一定比例时，碳排放下降幅度越大则表明产业和行业脱钩状态越理想。

考虑到将八种脱钩状态同时纳入被解释变量会使计量模型颇为冗杂，且脱钩状态存在明显的优劣顺序。因此不能简单地用脱钩指数 (T) 的大小来衡量产业增长与碳排放之间的脱钩关系。故本文参考现有文献 (米明金程和赵忠秀, 2022) 依据脱钩的优化排序重新归纳为五种状态，并构建被解释变量 ($tapioc$)。将产业和行业碳脱钩状态分为：理想状态 (增长强脱钩, $tapioc = 4$)、弱脱钩状态 (增长弱脱钩、衰退弱脱钩, $tapioc = 3$)、不脱钩状态 (增长不脱钩、衰退不脱钩, $tapioc = 2$)、联结状态 (增长联结、衰退联结, $tapioc = 1$)、恶劣状态 (衰退强脱钩, $tapioc = 0$)。Tapio (2005) 分类标准下的八类碳脱钩状态及被解释变量设定见表 4 所示 (Tapio, 2005)。表 3 的 (2) 列展示，产业数字化的系数是 -0.276 ，并在 5% 统计水平上显著，表明产业数字化能改善产业的碳排放脱钩状态。本文认为，同时考虑经济增长和环境因素后，产业数字化仍能降低碳排放。即替换被解释变量后，基准回归的结论依然稳健。

表 4 城市碳排放脱钩类型

脱钩类型	二氧化碳增长率	经济增长率	脱钩指数范围	变量设定
增长强脱钩	-	+	$T < 0$	$tapioc = 4$
增长弱脱钩	+	+	$0 < T < 0.8$	$tapioc = 3$
衰退弱脱钩	-	-	$T > 1.2$	$tapioc = 3$
增长不脱钩	+	+	$0.8 < T < 1.2$	$tapioc = 2$
衰退不脱钩	-	-	$0.8 < T < 1.2$	$tapioc = 2$
增长联结	+	+	$T > 1.2$	$tapioc = 1$
衰退联结	-	-	$0 < T < 0.8$	$tapioc = 1$
衰退强脱钩	+	-	$T < 0$	$tapioc = 0$

注：“+”代表正向变化，“-”代表负向变化。

2. 替换解释变量

利用直接依赖度测度的产业数字化能直观反应本产业对数字行业的直接消耗占比。因此，使用直接依赖度 ($digit_r$) 作为稳健性检验。表 3 (3) 列研究发现，用直接依赖度测度的产业数字化的系数是 -0.690 ，在 1% 的显著性水平下显著。该系数的绝对值小于基准回归。本文认为，产业的直接数字化投入不仅影响本产业的完全碳排放强度，还通过产业之间的关联效应间接影响本产业的完全碳排放强度。因此，采用直接依赖度测度产业数字化低估了产业数字化对产业碳排放强度的影响。该结果表明替换核心解释变量后，基准回归的结论依然稳健。

3. 增加控制变量

为减少因遗漏变量导致的误差，进一步控制了当前教育支出总额占公共机构总支出的百分比 ($education$)、研发支出占国内生产总值的比重 ($research$)、对数后的国内信贷净额 ($lncredit$) 和外国直接投资净额 ($lnFDI_net$)。表 3 (4) 列展示在增加控制变量后，产业数字化的系数是 -0.463 ，在 1% 的显著性水平下显著。该结果表明增加控制变量后，基准回归的结论依然稳健。

4. 交互固定效应

传统固定效应模型无法解决那些既随时间变化又随个体变化的不可观测变量带来的内生性问题。Bai (2009) 在线性面板模型中引入了个体和时间的交互效应，来反映共同因素对不同个体影响的差异 (Bai, 2009)。与传统的面板固定效应模型相比，交互固定效应 ($interactive\ fixed\ effect$) 模型在具体问题中能更好地反映现实，它充分考虑到现实经济中存在的多维冲击，以及不同个体对这些冲击反应力度的异质性，并将传统的双向固定效应进一步拓展为更一般的形式。基于此，本文同时控制国家、年份和行业、年份的交互固定效应进行稳健性检验。表 3 中 (5) 列是加入交互固定效应后，产业数字化的系数为 -1.094 ，并在 1% 统计水平上显著表明，产业数字化降低了产业碳排放强度状态，基准回归的结论依然稳健。

5. 内生性问题处理

本文通过三种方式构建工具变量，处理内生性问题：

(1) 参考祝树金等 (2018) 的方法，将产业数字化滞后一期作为工具变量 ($iv1$)。表 5 (1) 列为两阶段最小

二乘法第一阶段结果,表明产业数字化与工具变量呈现显著正相关关系。(2)列为两阶段最小二乘法第二阶段结果,产业数字化的系数为-1.181,在1%显著性水平下显著,表明考虑内生性问题后,基准回归的结论依然稳健。

(2)参考蔡竞和董艳(2016)将经济体分为发达经济体和发展中经济体。本文将除本产业外的同年、同经济体及同行业数字化均值作为工具变量(*meandigit1*)。构建该工具变量的合理性体现在:一是,此工具变量与该国该产业数字化相关性较强,满足相关性要求;二是,该工具变量排除本产业数字化,因此该工具变量不会对本产业的完全碳排放强度产生影响,满足排他性要求。表5的(3)列为两阶段最小二乘法第一阶段结果,表明产业数字化与工具变量呈现显著正相关关系。(4)列为两阶段最小二乘法第二阶段结果,表明产业数字化的系数为-3.184,在1%显著性水平下显著,表明考虑内生性问题后,基准回归的结论依然稳健。

(3)本文参考蔡竞、董艳(2016)将样本中的国家按照所处的区域分为北美、北欧、西欧、中欧、南欧、东欧、东亚和其他国家。本文将除本产业外的同年、同区域和同行业数字化均值作为工具变量(*meandigit2*)。构建该工具变量的合理性体现在:一是,此工具变量与该产业数字化相关性较强,满足相关性要求;二是,该工具变量排除了本产业数字化程度,因此该工具变量不会对本产业的完全碳排放强度产生影响,满足排他性要求。表5的(5)列为两阶段最小二乘法第一阶段结果,表明产业数字化与工具变量呈现显著正相关关系。(6)列为两阶段最小二乘法第二阶段结果,表明产业数字化的系数为-3.046,在1%显著性水平下显著,表明考虑内生性问题后,基准回归的结论依然稳健。

(三)机制检验

为探讨产业数字化影响完全碳排放强度的影响机制,本文建立回归模型为

$$M_{cit} = \alpha_0 + \alpha_1 digit_{cit} + \sum \alpha X_{cit} + u_c + v_i + \mu_t + \varepsilon_{cit} \quad (6)$$

$$carbon_{cit} = \alpha_0 + \alpha_1 M_{cit} + \sum \alpha X_{cit} + u_c + v_i + \mu_t + \varepsilon_{cit} \quad (7)$$

其中:*c*为国家;*i*为行业;*t*为年份;*carbon_{cit}*为被解释变量,即*c*国*i*行业*t*年的碳排放的完全依赖度;*digit_{cit}*为产业数字化;*M*为中介变量,即产业总投入;*X*为一系列控制变量;*u_c*为国家效应;*v_i*为行业效应;*μ_t*为年份效应;*ε_{cit}*为随机扰动项。为保证结果的可靠性,本文控制国家、行业和年份固定效应,并采用稳健标准误,以缓解潜在的国家、行业与宏观经济因素对估计结果的扰动。

表6的(1)列显示,产业数字化与产业中间投入的回归结果,产业数字化的系数为-0.065,在5%显著性水平下显著,该结果揭示了产业数字化能降低产业中间投入。(2)~(4)列分别为中间投入与完全碳排放强度、碳排放总量及脱钩指数的回归结果。结果显示,中间投入能促进完全碳排放强度和总量的增长,能抑制碳排放脱钩。因此,本文认为产业数字化通过替代其他中间投入,或提高中间投入的产出效率,降低了中间总投入量,提高了中间投入品的利用效率,进而降低了完全碳排放总量和强度,促进了产业增长与碳排放的脱钩。

表5 内生性问题处理

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>firstdigit</i> <i>digit</i>	<i>second</i> <i>carbon</i>	<i>firstdigit</i> <i>digit</i>	<i>second</i> <i>carbon</i>	<i>firstdigit</i> <i>digit</i>	<i>second</i> <i>carbon</i>
<i>digit</i>		-1.181*** (-4.48)		-3.184*** (-18.63)		-3.046*** (-17.59)
<i>iv1</i>	0.849*** (495.46)					
<i>meandigit1</i>			0.942*** (286.42)			
<i>meandigit2</i>					0.885*** (273.45)	
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Sargan statistic</i>		0.000		0.000		0.000
<i>Weak identification test</i> (16.38[10%])		2.5×10 ⁵		82036.51		74774.74
<i>Underidentification test</i>		26046.04***		22593.43***		22005.75***
<i>Constant</i>	0.010** (2.30)	-0.385 (-0.68)	-0.008 (-0.66)	5.329*** (9.53)	-0.004 (-0.35)	5.320*** (9.52)
<i>Observations</i>	29124	29124	31163	31163	31163	31163
<i>R²</i>		0.447		0.255		0.255

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著;括号里面内容表示*t*统计量。

表6 中介机制检验

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>input1</i>	<i>carbon</i>	<i>t</i>	<i>tapio</i>
<i>digit</i>	-0.065** (-2.492)			
<i>input1</i>		0.841*** (8.126)	24838.019*** (7.051)	-0.251*** (-5.542)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>-cons</i>	0.624*** (17.202)	-1.811*** (-4.002)	-2.36×10 ⁵ *** (-3.061)	0.139 (0.532)
<i>N</i>	31163	31163	31163	30791
<i>r2_a</i>	0.6659	0.4606	0.1815	0.2306

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著;括号里面内容表示*t*统计量。

(四) 异质性分析

1. 行业异质性

农业种植业中的农药、农膜、化肥、播种、灌溉,养殖业中反刍动物肠道甲烷排放、畜禽粪污处理等流程均能产生大量温室气体。但同时,农田也具有固碳的功能。因此,农业具有“绿色”属性和多重功能。农业的减排固碳同样是实现碳达峰和碳中和的重要突破点。为探究农业数字化对农业完全碳排放强度的影响,本文进行了异质性检验。表 7 的(1)列为农业数字化对完全碳排放强度的实证结果。(2)~(4)列为农业细分下的作物和动物生产、狩猎及相关服务活动(简称“种植业和畜牧业”),林业和伐木(简称“林业”),渔业和水产养殖(简称“渔业”)的数字化对其完全碳排放强度的实证结果。研究发现,行业数字化不仅能降低整体农业的完全碳排放强度,还能降低种植业和畜牧业、林业的完全碳排放强度,但对渔业的完全碳排放强度没有显著影响。

制造业是能源消耗和碳排放的重要来源。为探索制造业的减排路径,本文进一步探究制造业数字化对其完全碳排放强度的异质性影响。表 8 的(1)~(3)列分别为整体制造业,非污染和污染制造业数字化与其完全碳排放强度的实证结果。研究发现,制造业数字化对整体制造业、非污染和污染制造业的完全碳排放强度均有抑制作用,且产业数字化对污染制造业完全碳排放强度的抑制作用要大于非污染制造业,也就是说产业数字化在污染制造业中的减排潜力更大。

交通运输领域是碳排放大户。降低交通运输业的碳排放一直以来都是减排的重要领域。为此,本文对交通运输业进行了异质性检验。表 89(1)~(6)列分别是整体交通运输业,陆路和管道运输,水运、空运、仓储和运输支持活动,邮政和信使活动行业数字化对各自完全碳排放强度的实证结果。研究结果显示,产业数字化能降低整体交通运输业,陆路和管道运输,空运,仓储和运输支持活动,邮政和信使活动的完全碳排放强度,但是不能降低水运的完全碳排放强度。

接下来,本文对其他产业进行了异质性分析。表 10 的(1)~(5)列分别展示了采矿业,水的收集、处理和供应,污水处理,建筑业,住宿和餐饮业数字化对其完全碳排放强度的实证结果。研究发现,采矿

表 7 农业数字化对农业完全碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	整体 <i>carbon</i>	种植业和畜牧业 <i>carbon</i>	林业 <i>carbon</i>	渔业 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-2.522*** (-3.675)	-7.205*** (-3.936)	-3.176** (-2.343)	-0.893 (-0.198)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	0.265 (0.610)	2.466*** (5.153)	0.971** (2.512)	2.127* (1.923)
<i>N</i>	1722	594	564	564
<i>r2_a</i>	0.6518	0.9410	0.8960	0.7366

注: *、**、***分别表示 10%、5%、1% 的水平上显著;括号里面内容表示 *t* 统计量。

表 8 制造业数字化对制造业完全碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)
	整体 <i>carbon</i>	非污染 <i>carbon</i>	污染 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-0.324* (-1.842)	-0.802*** (-7.539)	-18.677*** (-4.771)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-1.032* (-1.674)	0.483** (1.988)	-1.526 (-1.042)
<i>N</i>	11056	6933	4123
<i>r2_a</i>	0.6123	0.7894	0.6162

注: *、**、***分别表示 10%、5%、1% 的水平上显著;括号里面内容表示 *t* 统计量。

表 9 交通运输业数字化对交通运输业完全碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	整体 <i>carbon</i>	陆路和管道运输 <i>carbon</i>	水运 <i>carbon</i>	空运 <i>carbon</i>	仓储和运输支持活动 <i>carbon</i>	邮政和信使活动 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-5.018***(-4.299)	-6.649***(-3.301)	-10.489(-0.703)	-18.510***(-2.657)	-1.543*(-1.699)	-2.032***(-2.593)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>_cons</i>	-8.725***(-3.983)	0.502(0.852)	-35.300***(-3.194)	-5.339***(-2.885)	0.891*(1.949)	-0.608(-0.789)
<i>N</i>	2906	594	592	593	594	533
<i>r2_a</i>	0.7595	0.9491	0.7906	0.8970	0.9227	0.7734

注: *、**、***分别表示 10%、5%、1% 的水平上显著;括号里面内容表示 *t* 统计量。

业数字化的系数为-14.071,在1%的显著性水平下显著。但其他行业数字化的系数并不显著。该结果表明数字化投入对采矿业的完全碳排放强度具有抑制作用,但对水业、建筑业、住宿和餐饮业的完全碳排放强度影响并不显著。

2. 区域异质性

本文按照国家所处的地理区位进行分类。表11的(1)~(7)列分别为北美、北欧、西欧、中欧、南欧、东欧^①和东亚产业数字化对其完全碳排放强度的实证结果。研究发现,产业数字化对北美、欧洲国家的产业完全碳排放强度具有抑制作用,但对东亚国家的产业完全碳排放强度的作用并不明显。

3. 经济体异质性

本文将样本中的国家分为发达经济体和不发达经济体。表12的(1)、(2)列分别为发达和不发达国家的产业数字化对其产业完全碳排放强度的影响。研究发现,在发达经济体中的产业数字化的系数为-1.427,在1%的显著性水平下显著。在不发达经济体中的产业数字化的系数为0.623,在5%的显著性水平下显著。该结果揭示了产业数字化对发达经济体的产业完全碳排放强度具有抑制作用,对不发达经济体的完全碳排放强度具有促进作用。

4. 不同发展状态的产业数字化与完全碳排放强度

本文按照产业数字化水平的高低分为高和低数字化产业两组。表12的(3)列、(4)列分别为,高和低产业数字化产业与其完全碳排放强度的实证结果。研究发现,产业数字化较高的行业其 $digit$ 的系数为-1.815,在1%的显著性水平下显著。低数字化投入行业的 $digit$ 的系数为0.392,但不显著。该结果揭示了,在高产业数字化产业中产业数字化降低了其完全碳排放强度,而在低数字化产业中产业数字化对其完全碳排放强度并没有显著的影响。

表10 产业数字化对其他行业完全碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	采矿业 <i>carbon</i>	水的收集、处理和供应 <i>carbon</i>	污水处理 <i>carbon</i>	建筑业 <i>carbon</i>	住宿和餐饮业 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-14.071*** (-2.856)	-0.049 (-0.030)	-1.741 (-1.010)	2.002 (1.012)	-1.306 (-1.567)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>-cons</i>	4.694*** (3.975)	8.307*** (4.734)	3.246*** (3.831)	6.173*** (7.566)	5.509*** (9.277)
<i>N</i>	590	564	519	594	594
<i>r2_a</i>	0.8869	0.8952	0.9499	0.9595	0.9249

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著;括号里面内容表示*t*统计量。

表11 产业数字化对不同区域完全碳排放强度的影响

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	北美 <i>carbon</i>	北欧 <i>carbon</i>	西欧 <i>carbon</i>	中欧 <i>carbon</i>	南欧 <i>carbon</i>	东欧 <i>carbon</i>	东亚 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-2.816*** (-6.139)	-2.396*** (-8.272)	-0.948*** (-3.448)	-0.564** (-2.279)	-1.754*** (-4.453)	-2.726*** (-6.135)	0.196 (0.364)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>-cons</i>	-14.234 (-0.680)	1.673 (0.821)	0.698 (0.340)	-6.039*** (-4.953)	9.731*** (6.237)	35.058*** (4.628)	3.430*** (4.882)
<i>N</i>	1588	3251	4038	5664	6998	3759	2250
<i>r2_a</i>	0.8141	0.6978	0.5856	0.6935	0.6997	0.5622	0.8079

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著;括号里面内容表示*t*统计量。

表12 不同经济体及不同产业数字化的异质性

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	发达 <i>carbon</i>	不发达 <i>carbon</i>	高数字化投入 <i>carbon</i>	低数字化投入 <i>carbon</i>
<i>digit</i>	-1.427*** (-8.425)	0.623** (2.231)	-1.815*** (-4.757)	0.392 (0.965)
<i>Control</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Country</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Industry</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>Year</i>	Yes	Yes	Yes	Yes
<i>-cons</i>	-4.900*** (-9.589)	1.428** (2.183)	0.667 (1.016)	-2.188*** (-3.825)
<i>N</i>	24670	6493	13835	17328
<i>r2_a</i>	0.3479	0.7538	0.5286	0.4707

注: *、**、***分别表示10%、5%、1%的水平上显著;括号里面内容表示*t*统计量。

五、结论

发展数字经济是把握新一轮科技革命和产业变革新机遇的战略选择。基于此,本文从产业数字化视角考察产业减排路径。利用WIOD的投入产出表和环境账户及WDI数据库进行经验分析,研究发现:第一,产业数字化能降低其完全碳排放强度。该结论在替换解释和被解释变量、增加控制变量及考虑内生性等稳健性检验后依然成立。第二,中介机制检验结果显示,产业数字化投入通过降低中间总投入量,进而降低了完全碳排放总量和强度,促进了产业增长与碳排放的脱钩。第三,异质性结果表明:①产业数字化能降低整体农业、种植业和畜牧业、林业、污染和非污染的制造业、整体交通运输业、陆路和管道运输、空运、仓储和运输

① 塞浦路斯虽地处亚洲,但是文化偏向欧洲且是个发达的资本主义国家,因此放入东欧国家样本中。

支持活动,邮政和信使活动及采矿业的完全碳排放强度。但对渔业、水运、水业、建筑业、住宿和餐饮业的完全碳排放强度没有显著影响;②产业数字化对北美、欧洲国家的行业完全碳排放强度具有抑制作用,但对东亚国家的行业完全碳排放强度的作用并不明显;③产业数字化对发达经济体的产业完全碳排放强度具有抑制作用,对不发达经济体的完全碳排放强度具有促进作用;④在高数字化产业中产业数字化降低了其完全碳排放强度,而在低数字化产业中产业数字化对其完全碳排放强度并没有显著的影响。

基于以上结论,本文提出如下政策建议:第一,应加快构建数字生态系统。政府应该建设和完善数字基础设施,促进数字技术创新,普及数字教育,提高数字产品的使用和应用能力,构建数字生态系统,提高产业数字化水平,为发展数字经济奠定良好的环境。第二,加快数字产业和传统产业的深入融合和协调发展。应发挥数字经济赋能传统产业的功能,促使产业充分利用大数据,改造、重组传统生产要素,进而节约能源,减少中间投入,提高生产效率和绩效,减少产业碳排放,降低产业碳排放强度,促进产业产出增长和碳排放脱钩。第三,通过产业关联效应,促进数字技术在产业间的溢出。数字技术和产业碳排放均能通过产业关联产生溢出。因此,应特别注意产业间碳排放转移的现象。

本文的局限性在于:产业数字化的衡量仍然是学术界的一个难点。由于产业数字化产出较难测量,因此从数字投入的视角刻画产业或行业数字化水平,且本文的产业数字化投入更侧重于数字基础设施的投入。该方法虽仍存在一定的局限性,但希望为后续研究提供了一定的思考。

参考文献

- [1] 蔡竞,董艳,2016.银行业竞争与企业创新——来自中国工业企业的经验证据[J].金融研究,(11):96-111.
- [2] 韩梦瑶,刘卫东,谢漪甜,等,2021.中国省域碳排放的区域差异及脱钩趋势演变[J].资源科学,43(4):710-721.
- [3] 黄玉霞,谢建国,2019.制造业投入服务化与碳排放强度——基于WIOD跨国面板的实证分析[J].财贸经济,40(8):100-115.
- [4] 李佳,2019.基于大数据云计算的智慧物流模式重构[J].中国流通经济,33(2):20-29.
- [5] 米明金程,赵忠秀,2022.产业集聚与企业出口碳脱钩[J].国际贸易问题,(9):17-34.
- [6] 田泽,肖玲颖,刘超,等,2023.中国城镇化对交通运输业碳排放的空间效应研究[J].技术经济,42(1):141-153.
- [7] 王桂军,李成明,张辉,2022.产业数字化的技术创新效应[J].财经研究,48(9):139-153.
- [8] 王杰,李治国,谷继建,2021.金砖国家碳排放与经济增长脱钩弹性及驱动因素——基于Tapio脱钩和LMDI模型的分析[J].世界地理研究,30(3):501-508.
- [9] 王艳秋,陶思佳,2023.工业智能化对中国工业碳排放效率的影响及空间效应研究[J].技术经济,42(1):130-140.
- [10] 吴金明,邵昶,2006.产业链形成机制研究——“4,4+4”模型[J].中国工业经济,(4):36-43.
- [11] 谢靖,王少红,2022.数字经济与制造业企业出口产品质量升级[J].武汉大学学报(哲学社会科学版),75(1):101-113.
- [12] 邢丁,徐康宁,2023.中国数字经济与企业集聚空间格局重塑[J].科学学研究,(4):1-15.
- [13] 许宪春,任雪,常子豪,2019.大数据与绿色发展[J].中国工业经济,(4):5-22.
- [14] 杨传明,2019.新旧常态下不同来源技术进步对中国产业碳强度的影响[J].技术经济,38(2):112-120.
- [15] 杨丹辉,胡雨朦,2022.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, No. 34(4):77-93.
- [16] 袁伟彦,方柳莉,罗明,2022.中国工业碳排放驱动因素及其脱钩效应——基于时变参数C-D生产函数的分解和测算[J].资源科学,44(7):1422-1434.
- [17] 赵凌云,杨来科,2020.价值链生产长度与中国制造业的碳排放[J].技术经济,39(5):156-162.
- [18] 祝树金,钟腾龙,李仁宇,2018.中间品贸易自由化与多产品出口企业的产品加成率[J].中国工业经济,(1):41-59.
- [19] AKIMOTO K, SANO F, ODA J, 2022. Impacts of ride and car-sharing associated with fully autonomous cars on global energy consumptions and carbon dioxide emissions[J]. Technological Forecasting and Social Change, 174(1): 121311.
- [20] BAI J, 2009. Panel data models with interactive fixed effects[J]. Econometrica, 77(4): 1229-1279.
- [21] CHENG Y, ZHANG Y, WANG J, et al, 2023. The impact of the urban digital economy on China's carbon intensity: Spatial spillover and mediating effect[J]. Resources, Conservation and Recycling, 189(2): 106762.
- [22] DONG F, HU M, GAO Y, et al, 2022. How does digital economy affect carbon emissions? Evidence from global 60 countries[J]. Science of The Total Environment, 852(24): 158401.
- [23] HAN D, DING Y, SHI Z, et al, 2022. The impact of digital economy on total factor carbon productivity: The threshold effect of technology accumulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 29(37): 55691-55706.
- [24] HOMROY S, 2023. GHG emissions and firm performance: The role of CEO gender socialization[J]. Journal of Banking and Finance, 148(3): 106721.
- [25] JIN X, YU W, 2022. Information and communication technology and carbon emissions in China: The rebound effect of energy intensive industry[J]. Sustainable Production Consumption, 32(2): 731-742.

- [26] PRAJOGO D, OLHAGER J, 2012. Supply chain integration and performance: The effects of long-term relationships, information technology and sharing, and logistics integration[J]. *International Journal of Production Economics*, 135(1): 514-522.
- [27] SAFIULLAH M, ALAM M S, ISLAM M S, 2022. Do all institutional investors care about corporate carbon emissions?[J]. *Energy Economics*, 115(5): 115106376.
- [28] SAFIULLAH M, KABIR M N, MIAH M D, 2021. Carbon emissions and credit ratings[J]. *Energy Economics*, 100(4): 105330.
- [29] SALAHUDDIN M, ALAM K, 2016. Information and communication technology, electricity consumption and economic growth in OECD countries: A panel data analysis[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 76(1): 185-193.
- [30] TAPIO P, 2005. Towards a theory of decoupling: Degrees of decoupling in the EU and the case of road traffic in Finland between 1970 and 2001[J]. *Transport Policy*, 12(2): 137-151.
- [31] WANG B, YU M, ZHU Y, et al, 2021. Unveiling the driving factors of carbon emissions from industrial resource allocation in China: A spatial econometric perspective[J]. *Energy Policy*, 158(11): 112557.
- [32] WANG J, DONG K, DONG X, et al, 2022. Assessing the digital economy and its carbon-mitigation effects: The case of China[J]. *Energy Economics*, 113(9): 106198.
- [33] WANG L, CHEN L, LI Y, 2022. Digital economy and urban low-carbon sustainable development: The role of innovation factor mobility in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(32): 539-557.
- [34] WANG L, CHEN Y, RAMSEY T S, et al, 2021. Will researching digital technology really empower green development?[J]. *Technology in Society*, 66(2): 101638.
- [35] YI M, LIU Y, SHENG M S, et al, 2022. Effects of digital economy on carbon emission reduction: New evidence from China [J]. *Energy Policy*, 171(12): 113271.
- [36] ZHANG J, LYU Y, LI Y, et al, 2022. Digital economy: An innovation driving factor for low-carbon development [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 96(5): 106821.
- [37] ZHANG L, MU R, ZHAN Y, et al, 2022. Digital economy, energy efficiency, and carbon emissions: Evidence from provincial panel data in China[J]. *Science of the Total Environment*, 852(24): 158403.
- [38] ZHANG W, LIU X, WANG D, et al, 2022. Digital economy and carbon emission performance: Evidence at China's city level[J]. *Energy Policy*, 165(6): 112927.
- [39] ZHOU X, ZHOU D, WANG Q, et al, 2019. How information and communication technology drives carbon emissions: A sector-level analysis for China[J]. *Energy Economics*, 81(3): 380-392.

Industrial Digitalization and Complete Carbon Emission Intensity: An Empirical Analysis Based on WIOD Cross Border Panel

Wu Yanan^{1,2}, Peng Biyu²

(1. School of Economics Guangzhou College of Commerce, Guangzhou 511363, China;

2. School of Economics & Management, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Existing research primarily focuses on analyzing the impact of the digital economy on the total, intensity, and efficiency of regional carbon emissions, with limited literature exploring the influence of industrial digitization on its complete carbon emission intensity. In order to address these research gaps and enrich the relevant literature, an empirical model was established to analyze the causal relationship between industrial digitization and its complete carbon emission intensity based on WIOD and WDI cross-border panel data. The findings of this research are as follows. Firstly, industrial digitization can actively reduce its complete carbon emission intensity. This conclusion remains valid after conducting robustness tests, such as substituting explanatory and dependent variables, incorporating control variables, and considering endogeneity. Secondly, industrial digitization reduces both the total and intensity of complete carbon emissions by reducing intermediate investments, promoting the decoupling of industrial growth and carbon emissions. Thirdly, digitization can decrease the complete carbon emission intensity in various sectors, including agriculture, crop and animal husbandry, forestry, manufacturing, transportation (including land, pipeline, and air transportation), warehousing and transportation support activities, postal and courier activities, as well as mining, in North American and European countries, and developed economies. However, there is no significant impact on the complete carbon emission intensity in industries such as fisheries, water transportation, the water industry, construction industry, and the accommodation and catering industry in East Asian countries and underdeveloped economies. Additionally, digitalization has a significant inhibitory effect on the intensity of complete carbon emissions in highly digital industries.

Keywords: industrial digitization; complete carbon emission intensity; input-output table