

引用格式: 杨来科, 闫珂. 数字化转型对中国制造业企业污染排放的影响: 基于微观层面的三维面板数据分析[J]. 资源科学, 2023, 45(8): 1481-1496. [Yang L K, Yan K. Impact of digital transformation on pollution emissions of manufacturing enterprises in China: A micro-level analysis based on three-dimensional panel data[J]. Resources Science, 2023, 45(8): 1481-1496.] DOI: 10.18402/resci.2023.08.01

数字化转型对中国制造业企业污染排放的影响 ——基于微观层面的三维面板数据分析

杨来科, 闫 珂

(华东师范大学经济与管理学院, 上海 200333)

摘 要:【目的】数字化转型为制造业企业节能减排提供了契机。厘清数字化转型对企业污染排放的影响和作用路径对推动经济高质量发展具有重要的政策启示。【方法】本文聚焦制造业企业污染排放, 基于中国工业企业数据库、中国工业企业污染排放数据库和世界投入产出表等3个数据库的匹配数据, 综合采用固定效应模型、调节效应模型以及工具变量法, 考察了数字化转型对制造业企业污染排放的影响及其作用机制。【结果】实证结果表明, 数字化转型能够显著地抑制制造业企业的污染排放, 且这种抑制作用在不同的行业、地区和不同的所有制企业中具有异质性, 其在高技术行业、东部及东北地区、外资企业和出口型企业中表现得更为明显。进一步的机制检验表明, 这种抑制作用是通过提高生产率、促进能源消费结构转型的前端控制和提升污染处理能力的末端治理实现的。【结论】数字化转型有利于优化企业环境绩效, 助力中国推进生态文明建设, 因此要加快推动数字技术赋能制造业企业绿色转型, 形成数字化和绿色化的良性循环, 引领新的经济增长点。

关键词: 数字化转型; 制造业企业; 污染排放; 投入产出法; 消耗系数; 中国

DOI: 10.18402/resci.2023.08.01

1 引言

截至2022年, 中国制造业增加值已连续12年位居世界第一。然而, 在全球制造业四级梯队格局中, 中国处于第三梯队, 与欧美等制造业强国仍有较大差距, “大而不强”是中国制造业亟待解决的问题。长期以来, 中国主要通过承接发达国家位于价值链低端的劳动密集型和污染密集型产业来嵌入全球价值链, “粗放型”的经济增长模式加之相对较弱的污染治理能力, 促使中国的经济发展和生态环境之间的矛盾日益尖锐。当前, 中国经济已经迈入高质量发展的新阶段, 破解资源环境约束难题, 推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现经济高质量发展的迫切需求。

作为经济活动的微观主体, 企业不仅是污染的

排放者, 也是环境治理中最为关键的环节。已有研究表明, 80%的环境污染来自企业的生产经营活动^[1]。目前, 关于企业污染排放的相关研究, 主要涉及对外开放和国内因素两大视角。关于对外开放的环境效应, 又分为对外贸易和外商投资两个方面; 国内因素对企业环境绩效的影响, 则主要包括环境规制^[2]、产业区位^[3]等方面。鲜有文献从数字化转型视角切入, 分析其对企业污染排放的影响及作用机理。

与此同时, 伴随着以人工智能、区块链、云计算、大数据等为代表的数字技术的蓬勃发展, 企业的生产和治理方式正在发生深刻变革。党的二十大报告强调, 要“加快发展数字经济, 促进数字经济和实体经济的深度融合”。已有研究表明, 促进数

收稿日期: 2023-03-01 修订日期: 2023-06-03

基金项目: 国家社会科学基金重点项目(22AGJ009); 上海市哲学社会科学一般项目(2021BJG002)。

作者简介: 杨来科, 男, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 研究方向为国际贸易与环境。E-mail: lkyang@bs.ecnu.edu.cn

通讯作者: 闫珂, 女, 河南周口人, 博士研究生, 研究方向为国际贸易与环境。E-mail: yanke_ecnu@sina.com

字经济和实体经济的深度融合,有助于提升产品质量^[4]与出口技术复杂度^[5]、加快企业技术创新研发^[6]、促进企业参与全球价值链分工^[7,8]并提高企业全要素生产率^[9]。现有的文献多聚焦于数字化技术的经济效应,部分学者开始注意到数字化技术的环境效应,并围绕碳排放水平^[10]、绿色全要素生产率^[11,12]、能源消耗^[13,14]等视角进行了实证检验。

制造业作为传统产业的压舱石,在依托数字技术为先进制造赋能,助力制造业企业突破“低端锁定”,实现由大转强的同时,也为企业节能减排带来新的契机。在此背景下,如何在不损害经济增长的情况下抑制企业的污染排放?制造业数字化是否能降低企业污染排放强度?通过哪种渠道实现?本文试图回答以上问题,以期为数字技术和实体经济深度融合、实现经济高质量发展提供经验证据。

相比现有的文献研究,本文可能的边际贡献有以下两点:①目前关于制造业数字化的环境效应研究主要聚焦宏观的国家、城市层面,对微观企业的讨论较少,少数基于微观企业的研究,也仅聚焦于机器人使用^[15]或信息和通信技术发展^[16,17]。本文从数字化转型切入,采用微观企业数据,探讨数字化转型对制造业企业污染排放的影响,并验证前端控制和末端治理两个影响企业污染排放的重要机制,在一定程度上拓宽了已有研究的范围。②相比较于已有文献的较为笼统的分析,本文进一步将污染排放区分为污染排放强度和污染排放量,且将研究置于经济全球化背景下,区分了不同来源和类型的数字化对不同类型的企业产生的异质性影响,使得文章的结论更为全面,深化并丰富了已有的文献。

2 文献综述与研究假说

2.1 文献综述

近年来,已有部分学者进行了数字化转型环境效应的相关研究,但是由于企业的数字化转型实践时间并不长,且数字化水平的统计分类和测度方法具有滞后性,相关研究还存在一些不足和缺陷。总的来讲,与本文相关的研究主要有3个方面:

(1)数字化转型指标的衡量与测度方法。这些方法包括:文本分析法^[4,18]、无形资产占比法^[6]、互联网综合发展指数法^[19]和消耗系数法^[5,8]等4种。其中,文本分析法和无形资产占比法常用来测度数字

化转型程度,但基于年报词频数的文本分析法受国家政策及当前经济运行情况的影响较大,存在数字化转型水平指标“高估”的问题;互联网综合发展指数法可以在一定程度上反映数字化转型程度和变化趋势,但无法体现数字化技术对宏观经济的贡献程度及其内在机理^[20];而消耗系数法以增加值核算的思想为基础,能反映国民经济各行业从事数字经济特征活动的情况,是测度数字化转型水平较为可行的方法。

(2)数字化转型的环境效应研究。现有文献研究主要形成以下3类观点:第一类研究认为,数字化转型能够改进企业的生产技术^[21],调整产业结构、改善能源结构^[22],提高生产效率^[23],促进社会公众形成绿色的消费观念^[24],因此,这类研究得出数字化转型有利于实现节能减排,提高环境质量^[25,26]的结论。第二类研究指出,数字经济发展本身需要由电力等能源消耗的支撑^[27],会产生相当大的碳足迹^[28];此外,数字化产品作为中间投入会向非数字化部门提供污染密集型中间投入,间接引致了大量的污染排放^[29];另外,数字化产业的发展还可能会带来能源需求的回弹效应,即能源效率的提高将会降低对该能源的需求,从而引致该能源的使用成本下降,引起需求反弹^[30]。因此,这类研究持数字化转型会加剧环境污染的观点。第三类研究认为,数字化技术是一把“双刃剑”,减排和增排效应并存,数字化转型和污染排放之间的关系存在不确定性,两者之间可能具备“倒U型”的特征^[31]。从上述分析发现,现有文献关于数字化转型对环境绩效的影响多数聚焦宏观的国家、城市层面,对微观企业的研究较少,少数基于微观企业的分析,也仅聚焦于机器人的使用或者信息通信技术的发展。此外,对于二者之间的关系还缺乏深入的理论机制分析,且具体影响的方向并未得出令人信服的一致结论。

(3)企业污染排放影响因素相关的文献研究。这方面的研究主要分为对外开放和国内因素两个视角:①对外开放又分为对外贸易和外商投资两方面。多数文献认为,参与对外贸易的企业其生产率较高,产出规模较大,更有可能进行减排投资,进而优化环境绩效^[32,33],但部分学者也发现了“出口生产率悖论”的存在^[34];而外商投资对环境的影响则有

2023年8月

“污染天堂”^[35]和“污染光环”^[36]两大对立的观点。②国内因素主要包括环境规制^[2]、产业区位^[3]等方面。值得注意的是,Shapiro等^[37]的研究将技术进步列为影响污染减排的重要渠道之一。在企业生产过程中,数字化技术的使用也属于技术进步的过程。随着数字化技术赋能实体经济的发展,企业数字化转型和企业污染排放的关系有待进一步探究:一方面,企业进行数字化转型有助于提高生产率,降低能源使用强度,从而有助于企业进行减排设备的投资,改进减排技术;另一方面,生产率的提高会带来产出规模的增加,从而会增加污染排放总量。总的来讲,数字化转型对企业污染排放的影响是复杂和不确定的,有待进一步检验。

2.2 研究假说

2.2.1 数字化转型与制造业企业的污染排放

制造业行业数字化转型是将数字技术与传统制造业产业的深度融合。数字技术与传统制造业行业不同的是,其本身就具有技术含量高、环境成本低的特点。数字化是研究环境问题的有效工具,数字化和绿色化的“两化融合”有助于企业从高投入、高耗能、高污染的粗放型生产模式向低碳、节能、高效的集约型生产模式转变,提高企业生产效率的同时兼顾改善环境绩效^[38]。具体来说,数字经济以其独有的平台化、共享化的特征,打破了生产要素的时空限制,改变了传统的生产和运营管理方法,为缩短产品研发周期、提高资源分配和生产效率提供了可能;同时,基于大数据、互联网和云计算的数字化技术可以增强企业信息流管理,使产品的生产设计满足“5R”(即轻量化、可重复、可回收、可再生、拒绝使用)原则^[39],从而在整个产品生命周期中减少有害污染物,最大限度地减少自然资源的消耗;此外,数字技术还可以通过溢出效应和学习效应赋能传统制造业,促进产业向高端化、智能化、绿色化发展,提高能源使用效率的同时减少污染排放。据此,提出本文的第一个假说:

H1:数字化转型能够降低制造业企业的污染排放强度。

2.2.2 数字化转型对制造业企业污染排放的影响机制分析

制造业企业通常可以采取两种方式减少污

染排放,一种是在生产前端,通过改进生产工艺来提高生产率和能源使用效率,降低污染排放强度;另一种是在排放末端采取干预措施,去除企业生产产生的污染物来减少污染排放。基于此,本文从前端控制和末端治理两个方面来进行机制分析。

首先,在生产的前端,物联网、人工智能等数字技术作为中间品投入到传统制造业行业,一方面,可以实现对生产流程的精确监测并根据实时生产状态进行及时有效的调整,使生产一直保持在效率前沿面上,促使企业生产率得到提高,将投入要素尽可能地转化为预期产品,使资源得到有效利用^[24],从而减少资源浪费,降低污染排放强度。此外,在数字化制造系统中,企业还能够通过将传感器和射频识别技术等嵌入到生产设备或生产线中,达到实时监测并自动优化环境条件的目的,从而减少污染排放量^[40]。另一方面,数字化转型有助于企业进行新能源的开发,促使企业进行能源消费结构转型^[41],减少煤炭等传统高污染能源的使用,转向清洁能源的使用^[15],从而减少污染排放。具体来讲,数字化技术不仅可以提供如风能、水能等清洁能源应用于生产中所需要的捕获、储存、运输等先进技术和高科技的设备,而且能够实时监控能源消耗状态,从而优化生产过程中的能源投入结构。

其次,在末端的污染排放环节,数字化技术可以通过优化企业生产条件来降低生产成本,从而使企业有更多的资本向排污设备更新升级倾斜^[42],提高企业的污染处理能力^[43],减少企业污染排放量。具体来讲,在污染物排放前,企业可以引进污染物过滤设备以降低污染物的排放量;在污染物排放后,企业可以通过加装污染物处理设备,完善污染物回收处理体系,最大可能降低排放出的污染物对环境的负面影响。据此,提出本文的第二个假说:

H2:数字化转型可以通过前端控制和末端治理这两条路径来抑制企业污染排放。

3 模型与数据

3.1 模型设计

本文依托企业层面的数据,考察制造业数字化转型对污染排放的影响,基于前文分析和已有的研究,构建如下回归模型:

$$\ln P_{ijt} = \alpha_0 + \alpha_1 Dig_{ijt} + \alpha_2 C_{ijt} + \delta_i + \delta_t + \varepsilon_{ijt} \quad (1)$$

式中:下标 i 、 j 、 t 分别表示企业、行业与时间;被解释变量 $\ln P$ 表示企业污染排放强度;核心解释变量 Dig 表示制造业行业数字化水平; C 表示企业和行业层面相关的控制变量; δ_i 和 δ_t 分别表示企业和时间固定效应; ε_{jit} 表示不可观测的随机误差项; α_0 、 α_1 、 α_2 表示待估参数。

3.2 指标选取与说明

(1)被解释变量:企业污染排放强度

为克服已有文献对企业污染排放强度测度的缺陷,本文采用熵值法,选取中国工业企业污染数据库中报告的工业废水排放量、化学需氧量排放量、二氧化硫排放量、氨氮排放量、氮氧化物排放量、烟尘排放量和工业粉尘排放量7个污染物排放指标进行综合评价,构造企业污染排放强度综合指数(表1)。具体做法如下:

首先,将上述各种污染物排放数据除以工业总产值,得到各污染物的排放强度;其次,对各污染物的排放强度进行标准化处理,以消除量纲:

$$\gamma_{rit} = \frac{m_{rit} - m_{\min(r)}}{m_{\max(r)} - m_{\min(r)}} \quad (2)$$

式中: r 表示污染物类型; γ_{rit} 表示标准化后的 i 企业污染物排放强度值; $m_{\max(r)}$ 和 $m_{\min(r)}$ 分别表示 i 企业第 r 项污染物强度的最大值和最小值; m_{rit} 表示 i 企业 t 年第 r 项污染物强度。

然后,计算 t 年第 r 项污染物的权重 z_{rit} :

$$z_{rit} = \gamma_{rit} / \sum_{i=1}^n \gamma_{rit} \quad (3)$$

式中: n 表示样本个数。

之后,计算第 r 项污染物的信息熵 e_{ri} :

$$e_{ri} = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n z_{rit} \times \ln z_{rit} \quad (4)$$

由信息熵可以计算出各指标的信息熵冗余度 d_{ri} :

$$d_{ri} = 1 - e_{ri} \quad (5)$$

接下来计算各指标的权重 w_{ri} :

$$w_{ri} = d_{ri} / \sum_{i=1}^n d_{ri} \quad (6)$$

由此,可以得到 i 企业污染排放强度的综合指数 p_{ri} :

$$p_{ri} = \sum_{i=1}^n p_{rit} = w_{ri} \times \gamma_{rit} \quad (7)$$

(2)核心解释变量:数字化水平

目前,现有的文献主要运用投入产出法中的直接消耗系数法和完全消耗系数法来表征要素投入水平^[44,45]。直接消耗系数的经济含义是指制造业某部门生产单位总产出直接消耗的各行业数字要素的数量,运用该行业中数字要素的投入占总投入的比率表示。在国民经济各行业间,除了直接消耗外,还存在间接消耗,而完全消耗系数则是指制造业某部门生产单位总产出对各部门数字要素的直接消耗和间接消耗之和,其与直接消耗系数相比,可以更为全面地反映制造业与数字化行业各部门之间的相互依存关系。本文借鉴刘斌等^[45]的做法,采用投入产出法中完全消耗系数的方法构建数字化转型指标,具体方法如下:

$$complete_{ad} = \beta_{ad} + \sum_{c=1}^s \beta_{ac} \beta_{cd} + \sum_{b=1}^s \sum_{c=1}^s \beta_{ab} \beta_{bc} \beta_{cd} + \dots \quad (8)$$

式中: $complete_{ad}$ 表示制造业行业 d 对数字化行业 a 的完全消耗量; β_{ad} 表示制造业 d 对数字化行业 a 的直接消耗量,也就是直接消耗系数; $\sum_{c=1}^s \beta_{ac} \beta_{cd}$ 表示制造业 d 通过行业 c 对数字化行业 a 的第一轮间

表1 变量的描述性统计

Table 1 Descriptive statistics of variables

变量(取对数)	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
企业污染排放强度	384231	1.666	1.384	0.000	13.035
数字化水平	384231	0.043	0.058	0.015	0.359
企业年龄	384231	2.356	0.787	0.000	6.026
企业资本密集度	246905	4.907	1.066	0.958	14.498
企业负债率	333201	0.440	0.181	0.000	7.880
企业生产率	384231	5.928	1.224	0.001	15.149
行业集中度	384231	3.376	1.820	0.000	9.210

2023年8月

接消耗; $\sum_{b=1}^s \sum_{c=1}^s \beta_{ab} \beta_{bc} \beta_{cd}$ 表示制造业 d 通过行业 c 再通过行业 b 对数字化行业 a 的第二轮间接消耗; 以此类推。

由于完全消耗系数法的绝对指标忽略了数字化投入相对于其他中间投入对制造业的相对重要性, 故本文参考张晴等^[8]的做法, 构建完全依赖度指标:

$$Dig_d = complete_{ad} / \sum_{u=1}^s complete_{ud} \quad (9)$$

式中: Dig_d 表示制造业行业 d 的数字化水平; $complete_{ad}$ 表示制造业行业 d 对数字化行业 a 的完全消耗量; $complete_{ud}$ 表示制造业行业 d 对任一行业 u 的完全消耗量; $\sum_{u=1}^s complete_{ud}$ 表示制造业行业 d 对所有行业的完全消耗量。

在行业选取上, 参考党琳等^[5]的做法, 选取计算机、电子和光学产品的制造(C26)、电信(J61)和计算机编程、咨询和相关活动及信息服务活动(J62_J63)3个行业作为数字化投入行业, 其中, C26为数字制造业, J61和J62_J63为数字服务业。

(3)其他控制变量

本文选取如下控制变量: 企业年龄, 采用当年年份减去企业开业年份再加1表示; 企业生产率水平, 采用企业工业总产值与职工人数的比值表示; 企业资本密集度, 采用企业固定资产净值与职工人数的比值表示; 企业负债率, 采用企业负债合计与资产总计的比值表示; 行业集中度, 使用赫芬达尔指数(HHI)表示, 具体做法是:

$$HHI_{jt} = (sale_{ijt} / sale_{jt})^2 \quad (10)$$

式中: $sale_{ijt}$ 表示 j 行业中的企业 i 在 t 年的销售额; $sale_{jt}$ 表示行业 j 在 t 年的总销售额; $sale_{ijt} / sale_{jt}$ 表示企业 i 在 t 年的市场占有率。对上述所有控制变量取对数处理以减轻异方差的影响。此外, 采用工业生产者出厂价格指数(PPI)对工业总产值进行平减, 采用固定资产投资价格指数对固定资产净值进行平减, 以剔除价格变动的影响。变量的描述性统计结果如表1所示。

3.3 数据来源与处理

本文数据主要有3个来源: 测度企业污染排放

强度的数据来自中国工业企业污染排放数据库, 企业生产相关的经济指标主要来自中国工业企业数据库, 制造业数字化水平测度用到数据来自2016年WIOD发布的2000—2014年世界投入产出表。将上述3个数据库进行匹配, 最终得到384231个企业层面的面板数据, 样本的时间区间为2000—2013年。因数据缺失, 未包含港澳台地区数据。

需要说明的是, 中国工业企业数据库和中国工业企业污染排放数据库所采用的行业分类方式为国民经济行业分类(GB/T 4754-2002), 而WIOD所采用的行业分类方式为国际标准行业分类(ISIC Rev4.0)。因此, 本文手动将二者进行匹配, 具体的行业匹配结果如表2所示。

4 实证分析

4.1 基准回归结果

表3报告了数字化转型对制造业企业污染排放强度的基准回归结果。所有回归均控制企业和时间双向固定效应, 表3的列(1)仅包含核心解释变量

表2 WIOD行业和国民经济行业匹配

Table 2 World Input-Output Database (WIOD) industry and national economic sector matching

ISIC	国民经济行业	合并后行业
C10-C12	农副食品加工、食品制造、饮料制造、烟草加工	食品饮料烟草
C13-C15	纺织业、服装鞋帽制造、皮革皮毛	纺织品及皮革制品
C16	木材加工及竹、藤、棕、草制品	木材及其制品
C17	造纸及纸制品	纸浆、纸制品
C18	印刷业、记录媒介的复制	印刷及音像制品
C19	石油加工及炼焦业	煤炭石油炼焦燃料
C20	化学原料及化学产品制造业	化学原料及其制品
C21	医药制造业	基本医药品
C22	橡胶制品、塑料制品	橡胶及塑料制品
C23	非金属矿物制品	其他非金属矿物
C24	黑色金属冶炼及压延加工、有色金属冶炼及压延加工	人工合成金属制品
C25	金属制品	基础金属制品
C26	计算机、通信和其他电子设备制造业	电子及其光学仪器
C27	电气机械及器材制造	电气设备
C28	通用设备制造、专用设备制造	机器设备
C29-C30	交通运输设备制造	交通设备
C31-C32	家具制造、仪器仪表及文化办公用机械制造、工艺品及其他制造	家具及其他制造业

表3 基准回归

Table 3 Benchmark regression

	(1) 污染排放 强度	(2) 污染排放 强度	(3) 污染排放 总量	(4) 总产出
数字化水平	-0.277*** (-3.120)	-0.238** (-2.490)	-0.362*** (-5.305)	0.272*** (4.999)
企业年龄		-0.003 (-0.768)	0.035*** (13.601)	0.082*** (39.933)
企业资本密集 度		0.170*** (56.020)	-0.043*** (-19.679)	-0.381*** (-220.803)
企业负债率		0.078*** (5.311)	-0.003 (-0.316)	-0.145*** (-17.410)
企业生产率		-0.338*** (-116.014)	0.120*** (57.675)	0.803*** (484.945)
行业集中度		0.046*** (16.872)	0.018*** (8.945)	-0.016*** (-10.335)
常数项	2.111*** (274.423)	2.818*** (124.346)	0.101*** (6.269)	8.693*** (674.377)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	384231	246839	246839	246839
R ²	0.846	0.886	0.863	0.966

注:括号内代表 t 值,*、**、***分别代表10%、5%、1%的显著性水平。下同。

制造业数字化水平,发现数字化水平的估计系数为-0.277,且在1%水平上显著,说明制造业数字化水平提升1个单位,可以使企业为污染排放强度降低27.7%。在加入控制变量后,由表3列(2)结果可见,制造业数字化的估计系数仍然显著为负,说明数字化转型会抑制制造业企业的污染排放强度,上述结果初步验证了H1。

进一步地,根据指标测度可知,企业污染排放强度等于企业污染排放总量比上企业总产出,那么企业污染排放强度的变化既有可能是由企业污染排放总量的变化引起,也有可能是由企业总产出的变化引起。基于此,本文将企业污染排放总量的对数值和企业总产出的对数值分别引入基准回归方程来考察其对制造业数字化的反应,结果列于表3的列(3)-(4)。结果显示,在企业污染排放总量作为被解释变量时,制造业数字化的估计结果在1%的水平上显著为负;在企业总产出作为被解释变量时,制造业数字化的估计结果在1%的水平上显著

为正;这说明制造业数字化对企业污染排放强度的抑制由企业污染排放总量的降低和企业总产出的增加同时作用引起。

4.2 稳健性检验

4.2.1 内生性处理

尽管在基准回归中对时间和企业的双向固定能够在一定程度上缓解内生性问题,但是数字化转型对制造业企业污染排放强度的影响仍然可能受到潜在的内生性因素的干扰。首先,模型中的其他控制变量可能和被解释变量企业污染排放强度之间存在反向因果关系;其次,尽管尽可能控制了影响企业污染排放强度的企业和行业层面的因素,但仍可能存在遗漏变量的问题。因此,本文借鉴刘维刚等^[46]的做法,选择日、韩两国制造业数字化水平的均值作为中国制造业数字化水平的工具变量。选择这个工具变量的原因是:中、日、韩三国同作为亚洲乃至全球最核心的经济体,在经济转型过程中都经历了20~30年的高速增长、人均GDP达到美国的50%~60%时,增速下降,且经济结构极为相似。日、韩两国在数字经济发展上的改革政策对中国数字化转型有着重要的借鉴意义。表4列(1)展示了IV-2SLS的回归结果,由实证检验结果可知:Kleibergen-Paap rk LM统计量的 P 值为0,有效拒绝了工具变量识别不足的假定;Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量在检验中最小特征值均大于Stock-Yogo检验10%的临界值,排除了弱工具变量的可能性,说明选取的工具变量与模型中的内生变量具有较强的相关性。此外,一个国家(行业)的制造业数字化水平对本国(本行业)企业污染排放强度的影响较大,而对其他国家(行业)的影响却十分有限,因此,本文选取的日本和韩国制造业数字化水平的平均值对中国制造业企业污染排放强度的影响是微乎其微的,由此验证了工具变量的外生性。综上所述,本文选取的工具变量是有效的。数字化水平的估计系数为负且在1%水平上显著,表明在模型克服了内生性问题以后,数字化转型仍具有抑制制造业企业污染排放强度的作用。

4.2.2 改变变量测度方式

由于变量的测度方式不同,可能会使本文的估

表4 内生性处理和替换变量处理

变量	Table 4 Endogeneity treatment and replacing the core explanatory variables				
	内生性处理	更换核心解释变量			更换被解释变量
	(1) 工具变量	(2) 直接投入依赖度	(3) 完全消耗系数	(4) 直接消耗系数	(5) 工业废水废气综合指标
数字化水平	-2.892*** (-101.744)	-0.119** (-2.248)	-0.075** (-2.204)	-0.155** (-2.407)	-0.157* (-1.879)
企业年龄	-0.104*** (-33.876)	-0.003 (-0.753)	-0.003 (-0.765)	-0.003 (-0.754)	-0.009*** (-2.958)
企业资本密集度	0.270*** (99.659)	0.170*** (56.016)	0.170*** (56.000)	0.170*** (56.010)	0.144*** (54.350)
企业负债率	0.640*** (45.654)	0.078*** (5.306)	0.078*** (5.301)	0.078*** (5.303)	0.051*** (4.000)
企业生产率	-0.418*** (-156.228)	-0.338*** (-116.024)	-0.338*** (-115.984)	-0.338*** (-116.018)	-0.257*** (-101.384)
行业集中度	-0.334*** (-118.875)	0.047*** (16.900)	0.046*** (16.836)	0.047*** (16.903)	0.047*** (19.476)
Kleibergen-Paap rk LM 统计量	1.3e+04*** [0.0000]				
Kleibergen-Paap rk Wald F 统计量	5.5e+05 {16.38}				
常数项		2.812*** (125.561)	2.815*** (124.939)	2.812*** (125.597)	1.731*** (87.660)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839	246839	246839
R ²	0.7233	0.886	0.886	0.886	0.806

计结果产生一定的偏误。基于此,本文分别采用直接投入依赖度、完全消耗系数和直接消耗系数的方法对核心解释变量——制造业数字化水平进行重新测度;又选取废水和废气这两个制造业企业主要的污染排放物,采用前文所述的熵值法构建综合指标来对被解释变量——企业污染排放强度进行重新估算。估计结果依次汇报于表4的列(2)–(5),结果显示,制造业数字化的估计系数均显著为负,验证了基准回归结果的稳健性。

4.2.3 剔除样本期内外生冲击的影响

(1)金融危机的影响

国际金融危机的爆发给世界各国经济带来了不同程度的冲击,中国也未能幸免。为了考察在金融危机前后数字化转型对制造业企业污染排放强度的影响,本文参考戴翔等^[47]的做法,构建了“金融危机”虚拟变量,以2008年为分界线,将在2008年

前及2008年的样本设定为“0”,将在2008年后的样本设定为“1”。估计结果如表5列(1)所示,在加入金融危机虚拟变量后,制造业数字化的估计系数值和显著性未发生变化,可以认为数字化转型对企业污染排放强度的抑制作用未受到国际金融危机的干扰,表明本文模型具有较高的稳健性。

(2)清洁生产标准的实施

中国生态环境部从2003年起陆续公布了多个行业清洁生产标准,与没有发布清洁生产标准的行业相比,发布清洁生产标准的行业面临更高的环境规制和更严格的行业准入限制,从而有利于降低企业污染排放强度^[48]。因此,若不剔除该项政策实施的扰动,可能会高估数字化转型对企业污染排放强度的影响。为此,参照郭娟娟等^[44]的做法,本文构建了“是否为清洁生产标准行业”和“行业发布清洁生产标准的时间”的交互项作为“清洁生产标准”的代

表5 剔除外生冲击的影响、极端值处理、行业数据再检验

Table 5 Excluding the influence of exogenous shocks, extreme value treatment and industrial data re-examination

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	金融危机的影响	清洁生产标准的实施	双边缩尾	剔除2010年样本	基于行业数据再检验
数字化水平	-0.238** (-2.490)	-0.205** (-2.138)	-0.239** (-2.490)	-0.238** (-2.490)	-0.098*** (-3.422)
企业年龄	-0.003 (-0.768)	-0.003 (-0.824)	-0.002 (-0.592)	-0.003 (-0.768)	-0.004*** (-3.425)
企业资本密集度	0.078*** (5.311)	0.079*** (5.402)	0.070*** (4.552)	0.078*** (5.311)	0.003 (0.794)
企业负债率	0.170*** (56.020)	0.170*** (56.009)	0.158*** (50.598)	0.170*** (56.020)	0.005*** (5.654)
企业生产率	-0.338*** (-116.014)	-0.338*** (-116.107)	-0.346*** (-113.617)	-0.338*** (-116.014)	-0.007*** (-8.063)
行业集中度	0.046*** (16.872)	0.047*** (16.895)	0.056*** (18.296)	0.046*** (16.872)	0.135*** (164.036)
金融危机	-0.514*** (-58.732)				
清洁生产标准		0.057*** (9.476)			
常数项	2.818*** (124.346)	2.818*** (124.387)	2.886*** (118.403)	2.818*** (124.346)	-0.473*** (-69.686)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839	246839	246839
R ²	0.886	0.886	0.885	0.886	0.574

理变量。估计结果如表5列(2),在加入“清洁生产标准”这个虚拟变量后,数字化水平的估计系数由基准回归的-0.238变为-0.205,在5%水平上显著,说明基准回归确实存在一定的“高估”,但数字化转型对企业污染排放强度的抑制作用仍稳健存在。

4.2.4 极端值处理

首先,为了减少异常值对研究结果的影响,本文参考一般文献的做法,对数据进行双边1%水平的缩尾;其次,由于中国工业企业数据库2010年的数据存在数据大量缺失、数据不符合会计基本准则等质量问题,可能会影响模型的估计结果,因此,本文对2010年的数据予以剔除处理。回归结果依次列于表5的列(3)和列(4),数字化水平的估计系数和显著性未发生改变。

4.2.5 基于行业数据再检验

本文探讨的是数字化转型对企业污染排放强

度的影响,所使用的被解释变量——企业污染排放强度是企业层面的样本,而核心解释变量——制造业数字化水平是行业层面的样本,因而在实证层面存在数据“错维”的问题^[38,44]。根据前文的论述,数字化转型确实能够抑制制造业企业的污染排放强度,但同一制造业行业内部的不同企业的污染排放强度具有很大的差异性。因此,本文将企业层面的污染强度指标加总到行业层面进行再次估计,结果如表5列(5)所示,发现制造业数字化的估计系数仍显著为负,再次验证了估计结果的稳健性。

4.3 异质性分析

4.3.1 微观层面

(1) 区分企业所有制

为考察数字化转型对不同所有制类型的制造业企业污染排放强度的差异化影响,本文参考国家统计局《关于划分企业登记注册类型的规定》^①,根

① 将登记注册类型为“国有与集体联营企业”“国有企业”“国有独资公司”“国有联营企业”“集体企业”“集体联营企业”“其他联营企业”“其他企业”“其他有限责任公司”“私营合伙企业”“私营有限责任公司”“私营独资企业”“私营股份有限公司”“股份合作企业”和“股份有限公司”的归为内资企业;将登记注册类型为“中外合作经营企业”“中外合资经营企业”“合作经营企业(港或澳台资)”“合资经营企业(港或澳台资)”“外商投资股份有限公司”“外资(独资)企业”“港澳台商投资股份有限公司”和“港澳台独资企业”的归为外资企业。

2023年8月

据样本企业的登记注册类型不同,将样本企业划分为内资企业和外资企业,检验结果如表6列(1)~(2)所示。其中,内资企业的数字化转型对企业污染排放强度的影响并不显著,而外资企业的数字化转型对企业的污染排放强度表现出显著的抑制作用。这或许可以用“污染光环假说”来解释:外资企业具有比本土企业更好的环境绩效表现,且能够通过技术溢出和管理效率的提高进一步改善东道国的环境绩效^[36]。

(2)区分是否为出口企业

在表6中本文进一步分析了出口和非出口企业的数字化转型对企业污染排放强度的影响差异。本文以出口额是否大于0为标准,将企业划分为出口企业 and 非出口企业,结果分别列于表6列(3)~(4)。其中,出口企业的数字化转型会显著抑制企业污染排放,而非出口企业则没有表现出这种抑制

作用。可能的解释是,出口企业相对于非出口企业拥有更高的生产率水平,从而导致其污染排放强度更低。

4.3.2 宏观层面

(1)区分行业类型

数字化转型对制造业企业污染排放强度的影响可能因行业技术水平的不同而具有差异性。本文据此将行业分为高技术水平行业 and 低技术水平行业两组^②,实证分析结果见表7列(1)~(2)。从中可以看出,高技术行业的数字化转型对制造业企业污染强度排放表现出了显著的抑制作用,而低技术行业则没有表现出显著的作用。这可能是因为,高技术行业本身资金雄厚、技术水平高的行业特征更有利于数字化技术的发展,且诸如计算机、电子和光学产品的制造,各种设备制造业行业本身对数字投入的依赖度也更高。

表6 异质性检验:微观层面

Table 6 Heterogeneity test: Micro level

变量	(1) 内资企业	(2) 外资企业	(3) 出口企业	(4) 非出口企业
数字化水平	0.041 (0.386)	-0.304*** (-2.991)	-0.164*** (-2.741)	0.091 (1.338)
企业年龄	-0.003 (-0.729)	-0.003 (-0.748)	-0.003 (-0.714)	-0.003 (-0.709)
企业资本密集度	0.170*** (56.010)	0.170*** (56.026)	0.170*** (55.981)	0.170*** (55.986)
企业负债率	0.078*** (5.301)	0.077*** (5.283)	0.078*** (5.313)	0.078*** (5.307)
企业生产率	-0.338*** (-116.012)	-0.338*** (-115.995)	-0.338*** (-115.879)	-0.338*** (-115.905)
行业集中度	0.046*** (16.802)	0.046*** (16.856)	0.046*** (16.795)	0.046*** (16.769)
常数项	2.808*** (124.577)	2.812*** (125.627)	2.811*** (125.669)	2.806*** (125.163)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839	246839
R ²	0.886	0.886	0.886	0.886

② 高技术行业包括“化学原料及化学品制造业”“医药制造业”“计算机、通信和其他电子设备制造业”“电气机械及器材制造业”“通用设备制造业”“专用设备制造业”“交通运输设备制造业”;低技术行业包括“农副食品加工业”“食品制造业”“饮料制造业”“烟草加工业”“纺织业”“服装鞋帽制造业”“皮革皮毛羽绒制品业”“木材加工及竹、藤、棕、草制品业”“造纸及纸制品业”“印刷业、记录媒介的复制”“石油加工及炼焦业”“橡胶及塑料制品业”“非金属矿物制品业”“黑色金属冶炼及压延加工”“有色金属冶炼及压延加工”“金属制品业”“家具制造业”“仪器仪表及文化办公用机械制造业”“工艺品及其他制造业”。

表7 异质性检验:宏观层面

Table 7 Heterogeneity test: Macro level

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	高技术行业	低技术行业	东部地区	西部地区	中部地区	东北地区
数字化水平	-0.203** (-2.314)	0.055 (0.150)	-0.349*** (-3.220)	0.202 (0.702)	0.435 (1.432)	-0.821* (-1.680)
企业年龄	-0.003 (-0.749)	-0.003 (-0.729)	-0.003 (-0.741)	-0.003 (-0.723)	-0.003 (-0.700)	-0.003 (-0.735)
企业资本密集度	0.170*** (56.023)	0.170*** (56.008)	0.170*** (56.025)	0.170*** (56.008)	0.170*** (56.012)	0.170*** (56.006)
企业负债率	0.078*** (5.313)	0.078*** (5.306)	0.078*** (5.310)	0.078*** (5.303)	0.078*** (5.309)	0.078*** (5.313)
企业生产率	-0.338*** (-116.026)	-0.338*** (-115.990)	-0.338*** (-115.987)	-0.338*** (-115.999)	-0.338*** (-116.001)	-0.338*** (-116.013)
行业集中度	0.046*** (16.875)	0.046*** (16.807)	0.046*** (16.874)	0.046*** (16.800)	0.046*** (16.787)	0.046*** (16.816)
常数项	2.813*** (125.472)	2.808*** (119.341)	2.817*** (125.251)	2.807*** (125.127)	2.806*** (124.935)	2.811*** (125.548)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839	246839	246839	246839
R ²	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886

(2) 区分地区发展水平

考虑到东、中、西部地区及东北三省在产业结构、经济发展水平等方面的差异性可能导致数字化转型对辖区内制造业企业的污染排放强度产生不同的影响。本文根据企业注册地所处的省(自治区、直辖市)不同,按照地理区位划分为四大地区子样本^③,结果分别列于表7列(3)–(6)。从中可见,得益于东部地区较高的经济发展程度,其数字化水平也处于全国领先地位,东部地区的数字化转型对制造业企业污染排放强度的抑制效应在1%水平上显著,且系数由基准回归的-0.238增加到-0.349;而中西部地区因其数字化发展程度整体仍处于较低水平,所以其对制造业企业污染排放强度未表现出显著的影响。令人惊讶的是,经济发展相对落后的东北地区的数字化转型对企业污染排放强度的影响如此之大,估计系数高达-0.821且在10%水平上显著,可能的原因是,东北地区更多的是资源依赖型

企业,污染排放强度处于相对较高的水平,所以其数字化水平对企业污染排放强度影响的边际效应较高。

(3) 区分数字化投入来源

在全球经济一体化的今天,本文关心依托不同来源的数字化投入会对制造业企业的污染排放强度产生怎样的差异化影响。为此,本文测算了来源于国内的数字化投入水平和来源于国外的数字化投入水平,并分别将其代入模型中作为核心解释变量来分析它们对企业污染排放强度的影响,结果如表8列(1)–(2)所示。其中,来源于国外的数字化投入水平对企业污染排放强度具有显著的抑制作用,而来源于国内的数字化投入水平对企业污染排放强度的抑制作用并不显著,这与前文研究不同所有制企业的异质性结果相呼应,也与戴翔等^[38]的结论相一致。出现这种情况的原因可能是,中国仍与美国等发达经济体在数字化水平上存在一定的差距,

③ 东部地区包括北京市、天津市、河北省、上海市、江苏省、浙江省、山东省、福建省、广东省、海南省;中部地区包括山西省、安徽省、江西省、河南省、湖北省、湖南省;西部地区包括内蒙古自治区、广西壮族自治区、重庆市、四川省、贵州省、云南省、西藏自治区、陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区;东北地区包括辽宁省、吉林省、黑龙江省。

表8 区分数字投入来源与类型
Table 8 Distinguishing the sources and types of digital inputs

变量	(1) 来源于国内的	(2) 来源于国外的	(3) 数字制造	(4) 数字服务
数字化水平	-0.025 (-0.246)	-0.163* (-1.949)	-0.228** (-2.485)	-5.556*** (-3.219)
企业年龄	-0.003 (-0.736)	-0.003 (-0.768)	-0.003 (-0.770)	-0.002 (-0.675)
企业资本密集度	0.170*** (56.009)	0.170*** (56.027)	0.170*** (56.022)	0.170*** (55.928)
企业负债率	0.078*** (5.305)	0.078*** (5.325)	0.078*** (5.311)	0.077*** (5.290)
企业生产率	-0.338*** (-116.010)	-0.338*** (-116.032)	-0.338*** (-116.010)	-0.338*** (-116.059)
行业集中度	0.046*** (16.811)	0.047*** (16.914)	0.046*** (16.865)	0.047*** (16.978)
常数项	2.810*** (124.558)	2.822*** (120.602)	2.816*** (125.046)	2.867*** (99.752)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839	246839
R ²	0.886	0.886	0.886	0.886

在经济全球化的条件下,制造业数字化投入更多地依托了国外先进的技术而非发展相对滞后的国内技术。

(4)区分数字化投入类型

不同类型的数字化投入对制造业企业的污染排放强度产生的影响是否相同呢?带着这个疑问,本文将数字化投入类型分为数字制造(C26)的投入和数字服务(J61,J62_J63)的投入,并进行了分别估算,将其分别代入模型作为核心解释变量进行回归,分析不同类型的数字化投入对制造业企业污染排放强度的差异性。结果显示,无论是数字制造还是数字服务均对企业污染排放强度产生了显著的抑制作用,但数字服务投入的抑制作用更大,这与户玉华等^[41]的研究结论一致。这是因为数字制造与数字服务相比,能源消耗强度更高,导致其改善环境绩效的效应被部分抵消了。

5 影响机制检验

根据前文的理论分析可知,数字化转型可以通过两种途径减少污染排放。接下来本文将对这两种途径进行逐一检验。

5.1 前端控制

为了验证数字化转型对企业生产率的影响,本文参考盛丹等^[15]的做法,构建职工人数、劳动生产率和资本生产率3个指标分别进行回归,回归结果见表9。列(1)是对职工人数进行回归,系数并不显著,说明制造业数字化并未使企业减少劳动力的投入;表9的列(2)–(3)分别是对劳动生产率和资本生产率进行回归,系数显著为正,说明制造业数字化促进了劳动生产率和资本生产率的提高。

接下来验证数字化转型对能源消费结构的影响。根据前文分析,企业能源消费结构转型,是指企业减少煤炭等高污染能源的使用和增加清洁能源的使用两方面。据此,首先,检验数字化转型对制造业企业的煤炭和清洁能源的消费分别有怎样的影响,而后构建煤炭消费和数字化水平的交互项“M1”以及清洁能源与数字化水平的交互项“M2”,将二者作为调节变量加入模型进行回归,以考察数字化转型对制造业企业能源消费结构的影响,回归结果见表10。表10的列(1)是数字化水平对煤炭消费量的回归,估计系数显著为负,说明数字化转型

表9 影响机制分析:提高生产率

Table 9 Mechanism of influence test: Improving productivity

变量	(1)	(2)	(3)
	职工人数	劳动生产率	资本生产率
数字化水平	0.037 (0.699)	0.293*** (3.642)	0.236*** (7.087)
企业年龄	0.078*** (39.277)	0.003 (0.926)	-0.007*** (-5.516)
企业资本密集度	-0.386*** (-231.152)	0.155*** (60.561)	-0.336*** (-317.858)
企业负债率	-0.163*** (-20.222)	-0.454*** (-36.869)	-0.134*** (-26.230)
企业生产率	-0.198*** (-123.809)	0.728*** (297.547)	0.282*** (277.978)
行业集中度	-0.020*** (-13.088)	0.033*** (14.264)	0.018*** (19.238)
常数项	8.957*** (719.288)	-0.584*** (-30.671)	0.492*** (62.337)
个体固定效应	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES
观测值	246839	246839	246839
R ²	0.938	0.897	0.859

可以抑制煤炭的使用;列(2)是数字化水平、煤炭消费量以及二者的交互项 $M1$ 对企业污染排放强度的回归,调节变量 $M1$ 系数显著为负,说明制造业数字化可以通过减少煤炭的使用进而降低企业污染排放强度;列(3)是数字化水平对清洁能源消费量的回归,估计系数显著为正,说明数字化转型增加了清洁能源的使用;列(4)是数字化水平、清洁能源消费量以及二者的交互项 $M2$ 对企业污染排放强度的回归,调节变量 $M2$ 系数显著为负,说明数字化转型可以通过增加清洁能源的使用从而降低企业污染排放强度。

5.2 末端治理

由前文的分析可知,数字化转型是通过提高企业污染处理能力来降低企业污染排放强度的。鉴于此,首先,检验数字化转型是否能够提高企业的污染处理能力,具体做法是:将某一污染物的处理能力定义为污染物的处理量比上污染物的产生量,同样采用熵值法将7种污染物的处理能力进行综合评价,构建企业污染处理能力指标;而后,将数字化

表10 影响机制分析:促进能源消费结构转型

Table 10 Mechanism of influence test: Promoting the transformation of energy consumption structures

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	煤炭消费量	企业污染排放强度	清洁能源消费量	企业污染排放强度
数字化水平	-0.680* (-1.697)	-0.841*** (-4.377)	0.559** (2.022)	-0.046 (-0.291)
企业年龄	0.055*** (4.553)	-0.022*** (-4.597)	-0.003 (-0.288)	-0.020*** (-4.049)
企业资本密集度	-0.050 (-0.864)	0.035 (1.537)	0.096** (2.103)	0.006 (0.215)
企业负债率	-0.157*** (-10.951)	0.152*** (26.687)	0.035*** (3.200)	0.142*** (22.773)
企业生产率	0.062*** (5.753)	-0.437*** (-101.448)	0.021** (2.575)	-0.408*** (-89.511)
行业集中度	0.070*** (6.379)	0.032*** (7.293)	-0.008 (-1.030)	0.038*** (8.495)
煤炭消费量		0.051*** (35.690)		
$M1$		-0.137*** (-4.955)		
清洁能源消费量				-0.026*** (-11.012)
$M2$				-0.083** (-2.277)
常数项	6.660*** (63.096)	3.715*** (89.721)	1.034*** (12.798)	3.599*** (79.468)
个体固定效应	YES	YES	YES	YES
时间固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	114336	114336	90731	90731
R ²	0.919	0.903	0.773	0.917

水平与企业污染处理能力相乘得到交互项“ $M3$ ”,并将其作为调节变量纳入模型进行回归,回归结果如表11所示。由表11的列(1)可知,数字化转型显著提高了制造业企业的污染处理能力;列(2)是数字化水平和企业污染处理能力及其交互项“ $M3$ ”对企业污染排放强度的回归,调节变量“ $M3$ ”系数显著为负,说明数字化转型可以通过提高企业的污染处理能力进一步抑制企业污染排放强度。至此,本文的H2得到验证。

2023年8月

表 11 影响机制分析提高污染处理能力

Table 11 Mechanism of influence test: Improving pollution treatment capacity

变量	treatment capacity	
	(1) 企业污染处理能力	(2) 企业污染排放强度
数字化水平	0.085*** (9.633)	-0.394*** (-4.022)
企业年龄	0.003*** (7.838)	-0.002 (-0.556)
企业资本密集度	-0.002*** (-5.691)	0.170*** (55.937)
企业负债率	-0.006*** (-4.794)	0.079*** (5.387)
企业生产率	0.001*** (3.773)	-0.338*** (-116.068)
行业集中度	-0.002*** (-8.367)	0.047*** (17.073)
企业污染处理能力		-0.238*** (-9.102)
M3		-3.475*** (-8.304)
常数项	0.114*** (54.455)	2.806*** (125.431)
个体固定效应	YES	YES
时间固定效应	YES	YES
观测值	246839	246839
R ²	0.758	0.886

6 结论与政策启示

6.1 结论

本文采用中国工业企业污染排放数据库,中国工业企业数据库和 WIOD 提供的世界投入产出表等 3 个数据库构建了一个企业-行业-年份的三维面板数据,综合运用固定效应模型、调节效应模型和工具变量法,实证分析了数字化转型对制造业企业污染排放强度的影响。主要结论如下:

(1)数字化转型显著降低了制造业企业的污染排放强度。实证结果显示,数字化水平每提升 1 个单位,可以使制造业企业污染排放强度降低 27.7%,且经过一系列的稳健性检验后该结论仍然成立。

(2)制造业数字化的环境效应存在明显的行业和地区异质性。数字化对于环境绩效的改善作用在高技术行业、外资企业、出口型企业比中低技术企业、内资企业和满足内需为主的企业更为显著,

且在东部及东北地区的表现比中西部地区更为良好。

(3)机制检验发现,制造业数字化对企业污染排放的抑制作用是通过生产率提高和能源消费结构转型的前端控制,以及提高污染处理能力的后端治理来实现的。

6.2 政策启示

本文的研究结论具有重要的政策含义:

(1)数字经济因其高技术投入和低污染排放的特点,能够兼顾经济增长和环境保护,有利于突破“低端锁定”,向价值链高端环节攀升,是经济高质量发展的重要推手。因此,要加快推动数字技术赋能制造业行业绿色转型,以数字化引领绿色化,以绿色化推动数字化,形成数字化和绿色化的良性循环,带动新的技术进步,引领新的经济增长点。

(2)加大对内资企业 and 非出口企业的政策倾斜和资金技术支持,为这些企业的数字化转型保驾护航,尽快缩小其与外资企业和出口企业的数字技术鸿沟。

(3)重点关注中西部地区、低技术行业的数字化转型,这些行业和地区在经济技术发展水平和能源消费结构上都有较大的后发优势,推进这些行业和地区的数字化转型能够在降低企业污染排放强度方面取得事半功倍的效果。

参考文献(References):

- [1] 沈红波, 谢越, 陈峥嵘. 企业的环境保护、社会责任及其市场效应: 基于紫金矿业环境污染事件的案例研究[J]. 中国工业经济, 2012, (1): 141-151. [Shen H B, Xie Y, Chen Z R. Environmental protection, corporate social responsibility and its market response: Case study based on the environmental pollution incident of Zijin Mining Group Co[J]. China Industrial Economics, 2012, (1): 141-151.]
- [2] 沈坤荣, 金刚, 方娴. 环境规制引起了污染就近转移吗?[J]. 经济研究, 2017, 52(5): 44-59. [Shen K R, Jin G, Fang X. Does environmental regulation cause pollution to transfer nearby?[J]. Economic Research Journal, 2017, 52(5): 44-59.]
- [3] 苏丹妮, 盛斌. 产业集聚、集聚外部性与企业减排: 来自中国的微观新证据[J]. 经济学(季刊), 2021, 21(5): 1793-1816. [Su D N, Sheng B. Industrial agglomeration, agglomeration externalities and firm emission reduction: New micro-evidence from China[J]. Chi-

- na Economic Quarterly, 2021, 21(5): 1793–1816.]
- [4] 杜明威, 耿景珠, 刘文革. 企业数字化转型与中国出口产品质量升级: 来自上市公司的微观证据[J]. 国际贸易问题, 2022, (6): 55–72. [Du M W, Geng J Z, Liu W G. Enterprises' digital transformation and quality upgrading in Chinese export products: Micro-evidence from listed companies[J]. Journal of International Trade, 2022, (6): 55–72.]
- [5] 党琳, 李雪松, 申烁. 制造业行业数字化转型与其出口技术复杂度提升[J]. 国际贸易问题, 2021, (6): 32–47. [Dang L, Li X S, Shen S. Manufacturing digital transformation and its export technological sophistication[J]. Journal of International Trade, 2021, (6): 32–47.]
- [6] 宋德勇, 朱文博, 丁海. 企业数字化能否促进绿色技术创新? 基于重污染行业上市公司的考察[J]. 财经研究, 2022, 48(4): 34–48. [Song D Y, Zhu W B, Ding H. Can firm digitalization promote green technological innovation? An examination based on listed companies in heavy pollution industries[J]. Journal of Finance and Economics, 2022, 48(4): 34–48.]
- [7] 吕越, 谷玮, 包群. 人工智能与中国企业参与全球价值链分工[J]. 中国工业经济, 2020, (5): 80–98. [Lv Y, Gu W, Bao Q. Artificial intelligence and Chinese enterprises' participate in global value chains[J]. China Industrial Economics, 2020, (5): 80–98.]
- [8] 张晴, 于津平. 制造业投入数字化与全球价值链中高端跃升: 基于投入来源差异的再检验[J]. 财经研究, 2021, 47(9): 93–107. [Zhang Q, Yu J P. Input digitization of manufacturing industry and upgrading in GVC: Reexamination based on the difference of input source[J]. Journal of Finance Economics, 2021, 47(9): 93–107.]
- [9] 杨慧梅, 江璐. 数字经济、空间效应与全要素生产率[J]. 统计研究, 2021, 38(4): 3–15. [Yang H M, Jiang L. Digital economy, spatial effects and total factor productivity[J]. Statistical Research, 2021, 38(4): 3–15.]
- [10] 任晓松, 孙莎. 数字经济对中国城市工业碳生产率的赋能效应[J]. 资源科学, 2022, 44(12): 2399–2414. [Ren X S, Sun S. The enabling effect of digital economy on urban industrial carbon productivity in China[J]. Resources Science, 2022, 44(12): 2399–2414.]
- [11] Zhang W J, Xu N, Li C Y, et al. Impact of digital input on enterprise green productivity: Micro evidence from the Chinese manufacturing industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.
- [12] Wang J L, Liu Y, Wang W L, et al. How does digital transformation drive green total factor productivity? Evidence from Chinese listed enterprises[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136954.
- [13] 方冬莉. 数字经济对中国城市能源利用效率的影响: 基于技术赋能和技术外溢视角[J]. 资源科学, 2023, 45(2): 296–307. [Fang D L. Impact of digital economy on energy utilization efficiency of Chinese cities from the perspective of technology empowerment and spillover[J]. Resources Science, 2023, 45(2): 296–307.]
- [14] Matthes M, Kunkel S, Dachrodt M F, et al. The impact of digitalization on energy intensity in manufacturing sectors: A panel data analysis for Europe[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.136598.
- [15] 盛丹, 卜文超. 机器人使用与中国企业的污染排放[J]. 数量经济技术经济研究, 2022, 39(9): 157–176. [Sheng D, Bu W C. The usage of robots and enterprises' pollution emissions in China[J]. Journal of Quantitative and Technological Economics, 2022, 39(9): 157–176.]
- [16] Jin J, Chen Z, Li S J. How ICT capability affects the environmental performance of manufacturing firms: Evidence from the World Bank Enterprise Survey in China[J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2021, 33(2): 334–354.
- [17] Wen H W, Lee C C, Song Z Y. Digitalization and environment: How does ICT affect enterprise environmental performance?[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(39): 54826–54841.
- [18] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现: 来自股票流动性的经验证据[J]. 管理世界, 2021, 37(7): 130–144. [Wu F, Hu H Z, Lin H Y, et al. Enterprise digital transformation and capital market performance: Empirical evidence from stock liquidity[J]. Journal of Management World, 2021, 37(7): 130–144.]
- [19] 郭家堂, 骆品亮. 互联网对中国全要素生产率有促进作用吗?[J]. 管理世界, 2016, (10): 34–49. [Guo J T, Luo P L. Does internet promote China's total factor productivity?[J]. Journal of Management World, 2016, (10): 34–49.]
- [20] 杨仲山, 张美慧. 数字经济卫星账户: 国际经验及中国编制方案的设计[J]. 统计研究, 2019, 36(5): 16–30. [Yang Z S, Zhang M H. A digital economy satellite account: International experiences and a conceptual design of China's compilation program[J]. Statistical Research, 2019, 36(5): 16–30.]
- [21] Moyer J D, Hughes B B. ICTs: Do they contribute to increased carbon emissions?[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2012, 79(5): 919–931.
- [22] 谢云飞. 数字经济对区域碳排放强度的影响效应及作用机制[J]. 当代经济管理, 2022, 44(2): 68–78. [Xie Y F. The effect and mechanism of digital economy on regional carbon emission intensity[J]. Contemporary Economic Management, 2022, 44(2): 68–78.]
- [23] 冯兰刚, 阳文丽, 王忠, 等. 中国数字经济与城市碳排放强度: 时空演化与作用机制[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 150–160. [Feng L G, Yang W L, Wang Z, et al. Digital economy and urban carbon emission intensity in China: Spatio-temporal evolution and mechanisms[J]. China Population, Resources and Environment, 2023, 33(1): 150–160.]
- [24] 许宪春, 任雪, 常子豪. 大数据与绿色发展[J]. 中国工业经济,

2023年8月

- 2019, (4): 5–22. [Xu X C, Ren X, Chang Z H. Big data and green development[J]. China Industrial Economics, 2019, (4): 5–22.]
- [25] Asongu S A. ICT, openness and CO₂ emissions in Africa[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(10): 9351–9359.
- [26] Chen L J. How CO₂ emissions respond to changes in government size and level of digitalization? Evidence from the BRICS countries [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(1): 457–467.
- [27] Salahuddin M, Alam K, Ozturk I. The effects of Internet usage and economic growth on CO₂ emissions in OECD countries: A panel investigation[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62: 1226–1235.
- [28] Belhkir L, Elmelig A. Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 177: 448–463.
- [29] Zhou X Y, Zhou D Q, Wang Q W, et al. How information and communication technology drives carbon emissions: A sector-level analysis for China[J]. Energy Economics, 2019, 81: 380–392.
- [30] 杨莉莎, 朱俊鹏, 贾智杰. 中国碳减排实现的影响因素和当前挑战: 基于技术进步的视角[J]. 经济研究, 2019, 54(11): 118–132. [Yang L S, Zhu J P, Jia Z J. Influencing factors and current challenges of CO₂ emission reduction in China: A perspective based on technological progress[J]. Economic Research Journal, 2019, 54 (11): 118–132.]
- [31] 汪东芳, 曹建华. 互联网发展对中国全要素能源效率的影响及网络效应研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(1): 86–95. [Wang D F, Cao J H. The impact of internet development on China's total factor energy efficiency and its network effects[J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(1): 86–95.]
- [32] 陈登科. 贸易壁垒下降与环境污染改善: 来自中国企业污染数据的新证据[J]. 经济研究, 2020, 55(12): 98–114. [Chen D K. Trade barrier reduction and environmental pollution improvement: New evidence from firm-level pollution data in China[J]. Economic Research Journal, 2020, 55(12): 98–114.]
- [33] 徐博, 杨来科, 钱志权. 全球价值链分工地位对于碳排放水平的影响[J]. 资源科学, 2020, 42(3): 527–535. [Xu B, Yang L K, Qian Z Q. The impact of global value chain position on carbon emissions [J]. Resources Science, 2020, 42(3): 527–535.]
- [34] 刘啟仁, 陈恬. 出口行为如何影响企业环境绩效?[J]. 中国工业经济, 2020, (1): 99–117. [Liu Q R, Chen T. How does export behavior affect firm environmental performance?[J]. China Industrial Economics, 2020, (1): 99–117.]
- [35] 张宇, 蒋殿春. FDI、政府监管与中国水污染: 基于产业结构与技术进步分解指标的实证检验[J]. 经济学(季刊), 2014, 13(2): 491–514. [Zhang Y, Jiang D C. FDI, government regulation and the water-pollution in China: An empirical test based on the decomposition of industry structure and the technology progress[J]. China Economic Quarterly, 2014, 13(2): 491–514.]
- [36] 邵朝对, 苏丹妮, 杨琦. 外资进入对东道国本土企业的环境效应: 来自中国的证据[J]. 世界经济, 2021, 44(3): 32–60. [Shao C D, Su D N, Yang Q. Environmental effects of fdi on domestic firms in host countries: Evidence from China[J]. The Journal of World Economy, 2021, 44(3): 32–60.]
- [37] Shapiro J S, Walker R. Why is pollution from US manufacturing declining? The roles of environmental regulation, productivity, and trade[J]. American Economic Review, 2018, 108(12): 3814–3854.
- [38] 戴翔, 杨双至. 数字赋能、数字投入来源与制造业绿色化转型[J]. 中国工业经济, 2022, (9): 83–101. [Dai X, Yang S Z. Digital empowerment, source of digital input and green manufacturing[J]. China Industrial Economics, 2022, (9): 83–101.]
- [39] de Sousa Jabbour A B L, Jabbour C J C, Foropon C, et al. When titans meet: Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2018, 132: 18–25.
- [40] Li Y, Dai J, Cui L. The impact of digital technologies on economic and environmental performance in the context of industry 4.0: A moderated mediation model[J]. International Journal of Production Economics, 2020, DOI: 10.1016/j.ijpe.2020.107777.
- [41] 户华玉, 余群芝. 制造业数字化转型能否降低出口隐含碳强度?[J]. 国际贸易问题, 2022, (7): 36–52. [Hu H Y, She Q Z. Does digital transformation of manufacturing reduce the embodied carbon intensity on exports?[J]. Journal of International Trade, 2022, (7): 36–52.]
- [42] Ye Z P, Yang J Q, Zhong N, et al. Tackling environmental challenges in pollution controls using artificial intelligence: A review [J]. Science of the Total Environment, 2020, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134279.
- [43] 占华, 后梦婷, 檀菲菲. 智能化发展对中国企业绿色创新的影响: 基于新能源产业上市公司的证据[J]. 资源科学, 2022, 44 (5): 984–993. [Zhan H, Hou M T, Tan F F. Influence of intelligentization on enterprise green innovation: Evidence from listed companies of new energy industry in China[J]. Resources Science, 2022, 44(5): 984–993.]
- [44] 郭娟娟, 许家云, 杨俊. 制造业服务化与企业污染排放: 来自中国制造业企业的证据[J]. 国际贸易问题, 2022, (5): 137–154. [Guo J J, Xu J Y, Yang J. Manufacturing servitization and firm pollution emissions: Evidence from China's manufacturing enterprises[J]. Journal of International Trade, 2022, (5): 137–154.]
- [45] 刘斌, 魏倩, 吕越, 等. 制造业服务化与价值链升级[J]. 经济研究, 2016, 51(3): 151–162. [Liu B, Wei Q, Lv Y, et al. Servitization of manufacturing and value chain upgrading[J]. Economic Re-

- search Journal, 2016, 51(3): 151–162.].
- [46] 刘维刚, 倪红福, 夏杰长. 生产分割对企业生产率的影响[J]. 世界经济, 2017, 40(8): 29–52. [Liu W G, Ni H F, Xia J C. The effects of production fragmentation on enterprises' productivity[J]. The Journal of World Economy, 2017, 40(8): 29–52.]
- [47] 戴翔, 马皓巍, 杨双至. 数字基础设施对制造业 GVC 分工地位的影响[J]. 国际商务(对外经济贸易大学学报), 2022, (5): 20–35. [Dai X, Ma H W, Yang S Z. The impact of digital infrastructure on GVC position in manufacturing[J]. International Business, 2022, (5): 20–35.]
- [48] 万攀兵, 杨冕, 陈林. 环境技术标准何以影响中国制造业绿色转型? 基于技术改造的视角[J]. 中国工业经济, 2021, (9): 118–136. [Wan P B, Yang M, Chen L. How Do environmental technology standards affect the green transition of China's manufacturing industry? A perspective from technological transformation[J]. China Industrial Economics, 2021, (9): 118–136.]

Impact of digital transformation on pollution emissions of manufacturing enterprises in China:

A micro-level analysis based on three-dimensional panel data

YANG Laike, YAN Ke

(School of Economics and Management, East China Normal University, Shanghai 200333, China)

Abstract: [Objective] Digital transformation provides an opportunity for manufacturing enterprises to save energy and reduce pollution emissions. Clarifying the impact of digital transformation on manufacturing enterprise pollution emissions and its mechanism provide important policy implications for high-quality economic development. [Methods] In this study, we used the fixed effect model, moderating effect model, and instrumental variable method to examine the impact of digital transformation on manufacturing enterprise pollution emissions and its mechanism based on the matching data of the China Industrial Enterprises Database, China Industrial Enterprises Pollution Emissions Database, and the World Input- Output Database. [Results] (1) The empirical results show that digital transformation can significantly inhibit the pollution emissions of manufacturing enterprises, and this inhibitory effect has heterogeneity across different industries, regions, and types of firm ownership. Specifically, the impact is greater in high-tech industries, eastern and northeastern regions, foreign investment firms, and export-oriented firms. (2) Further mechanism test results show that this inhibitory effect is achieved by the front-end control to improve productivity and promote energy consumption structure transformation, and back-end governance to improve pollution treatment capacity. [Conclusion] Digital transformation is conducive to optimizing enterprise environmental performance and helping advance ecological civilization. It is necessary to promote digital technology to empower the green transformation of manufacturing enterprises, form a virtuous cycle of digitalization and greening, and lead the formation of new economic growth points.

Key words: digital transformation; manufacturing enterprises; pollution emissions; input-output method; consumption coefficient; China