

# 数字化转型如何驱动制造企业 从碳锁定到碳解锁？

陈真玲 王雪婷 叶 青

**内容提要:**打破制造企业高碳锁定,提升碳解锁能力,已成为推动中国经济低碳转型的关键环节。本文将数字化转型、企业竞争力提升、内外部环境因素和碳解锁能力纳入统一的研究框架,基于2008—2023年中国制造业上市公司的面板数据,实证检验数字化转型对制造企业碳解锁的影响及其作用机制。研究结果显示,数字化转型能够有效提升制造企业碳解锁能力,其中产品生产数字化转型和商业运营数字化转型均具有赋能效应,但前者的赋能效应相对较弱;数字化转型通过提升企业竞争力促进碳解锁,其中经济竞争力的提升不仅能够直接推动碳解锁,还可以通过增强绿色创新竞争力和管理竞争力产生间接促进作用,而缓解融资约束和提高政府环境关注度可以强化这一促进效应。此外,数字化转型能够赋能大型制造企业碳解锁,但对中小型制造企业的促进效果不明显;与非国有企业和劳动密集型企业相比,数字化转型对国有企业和资本密集型企业的促进效应更强。本文的研究为制定促进数字化转型和制造业碳解锁的相关政策提供了参考。

**关键词:**数字化转型 碳解锁 制造企业 竞争力赋能 融资约束 政府环境关注度

**中图分类号:**F492;F424.1

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-7636(2025)12-0021-18

## 一、问题提出

传统能源为经济社会发展提供了重要支撑,但其过度使用也引发了诸多环境问题。化石燃料燃烧释放大量二氧化碳,导致全球气候变暖,进而引发更频繁的极端天气事件,严重威胁人类的生命和财产安全<sup>[1]</sup>。减少碳排放以实现可持续发展已成为全球共识<sup>[2]</sup>。作为一个负责任的大国,中国正有序推进碳达峰碳中和,积极寻找经济发展和生态环境保护统筹兼顾的方案<sup>[3]</sup>。制造业是中国实体经济增长的主要驱动力,也是中国碳排放量增长的主要来源,其发展模式具有高能耗、高排放的特征,能源结构转型困难,容易陷入碳锁定状态。碳锁定的概念最早由乌恩鲁(Unruh,2000)<sup>[4]</sup>提出,他认为碳锁定是化石燃料能源系统产生的自

收稿日期:2025-05-05;修回日期:2025-11-04

基金项目:国家社会科学基金一般项目“数字技术赋能制造业碳解锁机制与实现路径研究”(23BJY083);北京市教育委员会“市属高校分类发展-北京工商大学数字商学新兴交叉学科平台建设”资助项目;2025年度北京工商大学人文社科类重大重点培育专项项目

作者简介:陈真玲 北京工商大学经济学院教授、首都流通业研究基地研究员,北京,100048;

王雪婷 北京工商大学经济学院博士研究生;

叶 青 北京工商大学经济学院副教授,通信作者。

作者感谢匿名审稿人的评审意见。

我延续的惯性,是技术和制度相互作用的结果,在技术-制度复合体(techno-institutional complex, TIC)作用下的碳锁定一旦形成,便很难被取代。若不突破技术-制度复合体,全球升温可能突破 $2^{\circ}\text{C}$ 阈值,引发极端天气、物种灭绝等连锁反应,这将严重阻碍中国“双碳”目标实现和其他经济体绿色低碳转型<sup>[5]</sup>。推动制造业低碳转型,突破碳锁定困境,已成为当前中国实现“双碳”目标的关键。

技术进步往往被认为是破除经济增长与节能减排矛盾的重要驱动力<sup>[6]</sup>。数字经济迅速崛起,对社会生产、生活、生态环境以及经济发展模式产生了全面而深刻的影响<sup>[7]</sup>。数字技术的渗透使生产要素从低效部门向高效部门转移,提高了资源配置效率,最终有助于提高能源利用率<sup>[8]</sup>。数字经济的发展不断催生新型互联网技术,数字技术的普及可有效降低能源强度和单位产出能耗,实现经济和社会可持续发展<sup>[9]</sup>。在此背景下,探究数字化转型对制造企业碳解锁的赋能机制,成为落实“双碳”目标的关键路径。这不仅在实践层面具有紧迫性,也是理论层面亟待深入研究的重要议题。然而,已有研究大多致力于探索数字化转型对经济绩效或经济高质量发展的影响<sup>[10-11]</sup>,鲜有考察数字化转型与微观企业碳解锁之间的内在关联机制。本文尝试回答以下问题:数字化转型是否有利于制造企业碳解锁?如果数字化转型可以推动制造企业碳解锁,这种助推效果背后的赋能机制是什么?数字化转型对制造企业碳解锁的影响是否因企业所有权性质和规模等而异?

鉴于此,本文利用2008—2023年中国制造业上市公司面板数据,深入探讨制造企业数字化转型对企业碳解锁的影响及其作用机制。本文可能的贡献有:(1)将企业数字化转型、竞争力提升、内外部环境 and 碳解锁能力纳入统一的研究框架,提出数字化转型影响企业碳解锁能力的内在机制,扩展了数字化转型赋能企业碳解锁的相关理论。(2)为科学评估碳解锁提供新视角。不同于以往文献采用差值法<sup>[12]</sup>或者因子合成法<sup>[13]</sup>估算碳解锁程度,本文从动态视角,将碳解锁过程理解为相对某个特定时间基期的演变过程,利用观察期与基期的碳绩效变化来表征企业碳解锁程度。(3)为数字化转型赋能企业碳解锁提供了新的经验证据。以往文献大多采用定性研究分析碳锁定的成因及解锁路径<sup>[14]</sup>,少部分实证研究主要聚焦在区域或行业等宏观层面<sup>[15]</sup>,而关于微观层面碳解锁的实证研究相对缺乏。本文从微观企业层面深入挖掘数字化转型影响制造企业碳解锁能力的直接效应、作用渠道和交互效应,并在识别数字化转型对制造企业碳解锁能力的差异化影响的基础上,构建具有针对性的数字化转型赋能制造企业碳解锁路径,为政府制定相关政策提供了更为严谨的经验证据。

## 二、文献综述

碳锁定是化石燃料能源系统产生的自我延续的惯性,是技术和制度相互作用的结果,是一种持续的平衡或者准平衡状态,会对可替代的解决方案形成系统性的市场和政策壁垒<sup>[4]</sup>。在工业发展初期,碳密集型技术占据主导地位,尽管出现了低碳替换方案,但企业受制于既有技术系统的路径依赖和转换成本,往往倾向于维持原有的高碳生产模式,致使其生产活动和消费长期被锁定在高碳排放轨道上<sup>[16]</sup>。碳锁定阻碍了低碳技术和低碳产品的引入,导致持续的碳排放,加剧气候变化的不稳定性<sup>[17]</sup>。各行各业均可见碳锁定的迹象,能源密集型行业尤为突出<sup>[5]</sup>。目前,碳锁定已呈现全球化趋势,亟需引起全人类的高度重视,尤其是发展中国家。由于技术资源相对匮乏,发展中国家更容易深陷高碳发展路径<sup>[18]</sup>。

实现绿色低碳转型需要摆脱碳锁定,但是由于技术-制度复合体维持了碳锁定的平衡和准平衡状态,使得逃逸条件难以在系统内部自发形成,可能需要外源力的支持<sup>[19]</sup>。一些学者认为,实现碳解锁变革不能仅依靠传统科学技术,还需要行业、政策制定者和机构等主体之间更程度的协作<sup>[20]</sup>。摆脱碳锁定的根本出

路在于以可再生能源替代化石能源<sup>[21]</sup>,而可再生能源能够满足全球三分之二的能源需求<sup>[22]</sup>。在制造业中,既有的物理基础设施与生产技术所形成的碳锁定效应,成为企业实现低碳转型的主要障碍。因此,推动制造业实现碳解锁,是中国实现“双碳”目标的关键路径。已有研究发现数字化转型促进了可持续转型,有利于实现经济增长和碳减排双赢<sup>[23]</sup>。数字化转型有望赋能制造企业逃离碳锁定,但鲜有学者探究数字化转型对制造企业碳解锁的影响效应。

关于数字化转型与碳性能的研究尚处于起步阶段,数字化转型对碳解锁影响的研究更为匮乏,主要集中在数字化转型对碳减排影响的研究。学术界对数字化转型和碳性能之间的关系存在一定争议,目前有三种主流观点。一种观点认为数字化转型对碳减排具有积极影响,有利于全球零排放的实现<sup>[24]</sup>;数字经济对碳减排既有直接影响,也有间接影响<sup>[25]</sup>,并且存在空间溢出效应<sup>[26]</sup>。另一种观点认为数字经济的发展加剧了碳排放,即数字基础设施和数据中心的建设需要消耗大量资源,数据中心的运营以及数字技术的运行也需要消耗大量电力资源,并且数字技术的发展将扩大经济规模,消耗更多能源<sup>[27]</sup>。还有一种观点认为数字化转型与碳性能之间是一种非线性关系,如数字化转型和碳排放量之间呈现一种先增后减的倒 U 型曲线关系<sup>[28]</sup>。初期的数字经济通过提高生产效率和增加经济效益实现产能的持续扩张,增加能源需求和碳排放,而成熟阶段的数字经济通过对传统产业的融合和发展,促进产业结构升级,减少碳排放<sup>[29]</sup>。

碳锁定或碳解锁的实证研究多集中于区域、行业等宏观层面<sup>[16]</sup>,聚焦于微观层面碳解锁的研究较为缺乏。洞悉微观企业层面碳锁定的特点及影响机制,对于宏观层面科学制定碳解锁策略具有重要支撑作用。数字化转型通过广泛的信息基础设施建设、企业信息化改造以及数字创新网络提高生产效率、打破地域限制、重塑生产流程,在节能减排方面发挥着独特的优势。然而,制造企业数字化转型是否蕴含破解碳锁定之钥,还缺乏深入研究。

### 三、理论分析与研究假设

#### (一) 数字化转型与企业碳解锁

尽管数字化设备和数据中心在运行过程中会消耗大量能源、增加碳排放,但相较于传统技术,数字技术具有技术含量高、环境成本低等特征,在节能减排方面展现出较大的潜力和优势。数字技术通过缓解信息不对称提升资源配置效率,并借助物联网、区块链等技术强化能源与碳排放管理<sup>[30]</sup>。数字化转型可推动企业由高投入、高耗能和高污染的生产模式向低碳、节能和高效的生产模式转变,有助于企业在提高自身收益的同时减少对环境的负面影响<sup>[31]</sup>。

综上,本文提出假设 1:数字化转型能够赋能制造企业碳解锁。

#### (二) 数字化转型影响制造企业碳解锁的赋能机制

##### 1. 绿色创新竞争力赋能机制

绿色创新竞争力以保护环境和可持续发展为目标,有助于企业构筑差异化优势,增强市场竞争力。数字技术的应用可通过提高效率、实现差异化发展和强化渠道控制来创造竞争优势<sup>[32]</sup>。借助大数据分析等数字技术,企业能够深入洞察技术发展趋势,科学预测创新成果,并持续优化创新流程,从而推动技术创新的高效实现<sup>[33]</sup>。数字技术还有助于拓展知识边界,加速信息传播,促进产学研协同合作,进而提升绿色创新水平,这将激励企业积极采用低碳技术<sup>[34]</sup>。绿色发展竞争力在生态文明建设中发挥着重要作用,其与碳绩效呈现正相关关系<sup>[35-36]</sup>。

综上,本文提出假设2:数字化转型通过提升绿色创新竞争力促进制造企业碳解锁。

## 2. 管理竞争力赋能机制

推行数字化管理有助于企业获得持续竞争力,数字经济可引发企业内部管理变革<sup>[37]</sup>。在数字经济时代,企业可通过建立数字平台生态观的管理理论获得持续竞争力。对生产运营、内部后勤、市场营销和售后服务等环节按照低碳的发展目标进行管理再造有助于企业实现可持续发展<sup>[38]</sup>。数字技术可以改变甚至重塑企业管理流程,打破企业内部不同部门、模块以及环节的“数据孤岛”,通过数据分析和智能化决策增强企业内部控制能力,优化企业生产流程和资源配置,推动管理结构优化升级,实现高效运营管理,提高企业核心竞争力,助推企业实现低碳减排。

综上,本文提出假设3:数字化转型通过提升管理竞争力促进制造企业碳解锁。

## 3. 经济竞争力赋能机制

传统竞争力一般指经济竞争力,即企业以较低成本向客户提供符合质量标准的产品和服务,在市场竞争中获得超越对手的能力<sup>[39]</sup>。通常情况下,成长更快、利润更高、市场份额更大的企业更具竞争力。数字化转型有利于企业形成更灵活和更具竞争力的运营模式,使企业获得可持续的竞争优势<sup>[40]</sup>。在数字经济时代,企业通过加强合作来优化资源配置,从而提高资源利用效率。企业通过提高产品销量、促进产品出口、升级现有产能、淘汰落后产能等途径增强竞争力,有效抑制产能过剩,减少能源消耗,降低碳排放,从而实现转型升级。企业竞争力能够赋能企业绩效,企业绩效同时涵盖了经济价值、社会责任和环境效应<sup>[41]</sup>。经济竞争力提升可使企业更有资金实力进行绿色、低碳技术研发,促进企业绿色创新竞争力提升<sup>[42]</sup>。先进的管理方式驱动企业盈利能力提升,盈利能力的增强也会反哺企业管理升级。

综上,本文提出假设4:数字化转型通过提升经济竞争力促进制造企业碳解锁。

# (三) 数字化转型影响制造企业碳解锁的交互因素

## 1. 融资约束

企业数字化转型需要大量资金投入,如果资金不能得到保障可能会对企业数字化转型造成障碍,因此数字化转型会受到企业融资约束影响。一般来说,融资约束程度越低,数字化转型对企业碳解锁的促进作用越强。首先,缓解融资约束有助于企业更快更好地完成数字化转型,进而推动企业碳解锁。融资约束是影响企业投资的重要因素之一,缓解融资约束能够降低企业的信贷门槛,拓宽企业的融资渠道,使企业在数字化转型过程中获得更多资金支持,有助于企业快速推进数字化转型进程,实现更广范围、更深层次的数字化转型。其次,缓解融资约束可提升企业创新转化效率<sup>[43]</sup>,促进节能减排技术创新,提高能源利用率,减少碳排放。最后,缓解融资约束可使企业获取充足的现金流,以保障生产经营,支持业务拓展、产品研发等,为企业创造更多利润。

综上,本文提出假设5:缓解融资约束可以强化数字化转型对制造企业碳解锁的促进作用。

## 2. 政府环境关注度

在利润最大化目标下,制造企业通常缺乏主动减少碳排放的内在动力,这就需要环境规制进行约束和引导以促进碳解锁,而政府的环境关注以及环境规制的实施也会影响企业数字化转型。一方面,企业可以从政府环境关注中获得节能减排信号,从而改变投资方向,促进节能减排改造。另一方面,政府还会根据节能减排效果建立反馈机制,采取激励或者惩罚措施引导企业加大环保投资,促使企业开展绿色低碳技术的研发和推广<sup>[44]</sup>。

综上,本文提出假设 6:提高政府环境关注度可以强化数字化转型对制造企业碳解锁的促进作用。

## 四、实证设计

### (一) 样本选取与数据来源

为研究数字化转型对制造企业碳解锁的影响,并考虑数据的可获得性,初始数据涵盖 2007—2023 年沪深 A 股制造业上市公司,最终的回归分析样本期为 2008—2023 年。其中,2007 年的数据仅作为计算被解释变量碳解锁( $CUL$ )的基期基准,其本身并不作为观测值纳入回归模型。原始数据主要来自深圳希施玛数据科技有限公司 CSMAR 中国经济金融研究数据库、上海经禾信息技术有限公司中国研究数据服务平台(CNRDS)、中国能源统计年鉴、中国统计年鉴、政府工作报告和企业年度报告。本文剔除了 ST 和 \*ST 的样本,最终得到 10 677 个观测样本。

### (二) 模型设定

#### 1. 基准回归模型

本文设定如下基准回归模型,实证研究企业数字化转型对企业自身碳解锁的直接影响:

$$CUL_{it} = \alpha + \beta DT_{it} + X'_{it}\beta + \gamma_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, $i$  代表企业, $t$  表年份, $CUL_{it}$  代表  $i$  企业第  $t$  年的碳解锁能力; $DT_{it}$  代表  $i$  企业第  $t$  年的数字化转型程度; $X'_{it}$  代表控制变量向量; $\gamma_i$  为企业固定效应, $\lambda_t$  为年份固定效应; $\varepsilon_{it}$  为随机干扰项。

#### 2. 机制分析模型

如前所述,本文认为企业数字化转型通过提升企业竞争力这一关键渠道影响企业碳解锁能力。本文设定如下机制模型,实证检验数字化转型对绿色创新竞争力、管理竞争力和经济竞争力的影响效应:

$$M_{it} = \alpha + \beta DT_{it} + X'_{it}\beta + \gamma_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

其中, $M_{it}$  是机制变量,分别代表绿色创新竞争力、管理竞争力和经济竞争力。

#### 3. 交互影响分析模型

考虑到企业数字化与企业碳解锁的关系可能受到企业内部融资约束和外部政府环境关注的影响,本文设定如下交互影响分析模型:

$$CUL_{it} = \alpha + \beta DT_{it} + \beta_1 W_{it} + \beta_2 W_{it} \times DT_{it} + X'_{it}\beta + \gamma_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

其中, $W_{it}$  是交互变量,分别代表企业融资约束和政府环境关注程度。

### (三) 变量说明

#### 1. 被解释变量

企业碳解锁能力( $CUL$ )。高碳技术的规模效应会导致地方政府、制造企业和市场形成稳定的高碳路径锁定。随着低碳技术成本下降以及环境规制趋严,高碳企业会逐渐摆脱对化石能源的依赖,提升碳解锁能力<sup>[45-46]</sup>。虽然已有学者提出碳解锁的指标体系<sup>[47]</sup>,但是未从时间维度刻画企业从碳锁定到碳解锁这一变化过程。实际上,碳解锁能力的提升可以通过不同时期企业碳绩效的变化来衡量。如果相对基期而言,观察期的企业碳绩效数值增加,则该时期的碳解锁能力提升,反之则碳解锁能力下降。该指标能够反映企业从碳锁定到碳解锁的动态变化,从时间维度有效刻画碳解锁能力的提升过程。本文通过观察期与基期的差异来衡量企业碳解锁变化程度,具体公式如下:

$$CUL = CP_{it} - CP_{i0} \quad (4)$$

其中,  $CP_{it}$  代表  $i$  企业在第  $t$  年的碳绩效,  $CP_{i0}$  代表  $i$  企业的基期碳绩效, 本文基于数据可得性与政策背景的双重考虑, 以 2007 年企业碳绩效水平作为基期。碳绩效  $CP$  的计算公式为:

$$CP = \frac{OR}{CE} \tag{5}$$

其中,  $OR$  代表企业营业收入,  $CE$  代表企业二氧化碳排放量。

式(5)需要估算企业二氧化碳排放, 由于中国政府没有强制企业披露其碳排放数据, 本文无法直接获取企业碳排放数据, 参考以往文献<sup>[48]</sup>, 采用行业能源消耗数据进行估计。

2. 核心解释变量

数字化转型程度( $DT$ )。首先, 本文参考既有研究方法<sup>[49-50]</sup>, 采用关键词词频法测度企业数字化转型程度, 并参考赵宸宇等(2021)<sup>[51]</sup>的研究, 选取制造企业数字化转型关键词。其次, 本文从数字技术与实体经济深度融合视角出发, 根据制造企业全生产流程, 分别从产品生产和商业运营两个维度探究数字化转型对企业碳解锁的赋能机制, 分维度的关键词如表 1 所示。最后, 对获取的关键词总词频加 1 后取自然对数, 以此衡量制造企业整体数字化( $DT$ )、产品生产数字化( $DTP$ )以及商业运营数字化( $DTB$ )。

表 1 制造企业数字化转型关键词选取

维度	分词词典
产品生产数字化( $DTP$ )	人工智能、高端智能、工业智能、移动智能、智能控制、智能终端、智能移动、智能管理、智能工厂、智能物流、智能制造、智能仓储、智能技术、智能设备、智能生产、智能网联、智能系统、智能化、自动控制、自动监测、自动监控、自动检测、自动生产、数控、一体化、集成化、集成解决方案、集成控制、集成系统、工业云、未来工厂、智能故障诊断、生命周期管理、生产制造执行系统、虚拟化、虚拟制造
商业运营数字化( $DTB$ )	移动互联网、工业互联网、产业互联网、互联网解决方案、互联网技术、互联网思维、互联网行动、互联网业务、互联网移动、互联网应用、互联网营销、互联网战略、互联网平台、互联网模式、互联网商业模式、互联网生态、电商、电子商务、Internet、“互联网 + ”、线上线下、线上到线下、线上和线下、O2O、B2B、C2C、B2C、C2B

3. 机制变量

绿色创新竞争力( $GC$ )。绿色专利可以直观反映企业绿色技术创新的产出, 本文采用绿色专利占有率(企业绿色专利申请数量与行业绿色专利申请数量的比值)衡量绿色创新竞争力。

管理竞争力( $ICC$ )。本文选取内部控制能力作为企业管理竞争力的代理变量。内部控制对企业的风险管控至关重要, 是企业管理中重要的一环。参考梁上坤和董青(2023)<sup>[52]</sup>的研究, 本文采用迪博数据库公布的内部控制指数衡量企业内部控制能力。

经济竞争力( $EC$ )。企业经济竞争力可通过市场份额、盈利能力和销售增长率等指标衡量, 本文选取企业营业收入占有率(企业营业收入与行业营业收入的比值)作为企业经济竞争力的代理变量。

4. 交互变量

融资约束( $FC$ )。本文使用经典的 KZ 指数衡量企业的融资约束程度。该指数主要由经营性净现金流、现金股利、现金持有、资产负债率和托宾 Q 值(Tobin's Q)等指标构成。

政府环境关注度( $GEC$ )。本文利用政府工作报告中与环境相关的词频数量与报告词频总数的比值衡量政府环境关注度, 以表征政府的环境政策信号。

5. 控制变量

参考通行做法, 本文纳入的控制变量如下: 企业规模( $SIZE$ )、企业年龄( $AGE$ )、资产负债率( $LEV$ )、净资

产收益率(*ROE*)、固定资产比率(*FIX*)、股权集中度(*TOP*)、资本密集度(*CAP*)和环境规制强度(*EG*)。  
以上变量具体设定如表 2 所示。

表 2 变量说明

变量类型	变量符号	变量名称	测度方法
被解释变量	<i>CUL</i>	企业碳解锁能力	观察期企业碳绩效-基期年企业碳绩效
解释变量	<i>DT</i>	数字化转型程度	企业年报数字化转型词频数+1 后取自然对数
	<i>DTP</i>	产品生产数字化	企业年报产品生产数字化转型词频数+1 后取自然对数
	<i>DTB</i>	商业运营数字化	企业年报商业运营数字化转型词频数+1 后取自然对数
机制变量	<i>GC</i>	绿色创新竞争力	企业绿色专利申请量/行业绿色专利申请量
	<i>ICC</i>	管理竞争力	企业内部控制指数+1 后取自然对数
	<i>EC</i>	经济竞争力	企业营业收入/行业收入
交互变量	<i>FC</i>	融资约束	KZ 指数
	<i>GEC</i>	政府环境关注度	政府工作报告中与环境相关的词频数/总词频数
控制变量	<i>SIZE</i>	企业规模	企业总资产的自然对数
	<i>AGE</i>	企业年龄	观察年份与企业成立年份之差+1 后取自然对数
	<i>LEV</i>	资产负债率	总负债/总资产
	<i>ROE</i>	净资产收益率	净收入/股东权益余额
	<i>FIX</i>	固定资产比率	固定资产净值/总资产
	<i>TOP</i>	股权集中度	前十大股东的股份
	<i>CAP</i>	资本密集度	总资产/营业收入
	<i>EG</i>	环境规制强度	环境保护支出/一般公共预算支出

( 四) 描述性统计

为减少异常值影响,对各变量进行 1%和 99%的缩尾处理,具体描述性统计结果如表 3 所示。其中,企业碳解锁能力(*CUL*)的最大值和均值分别为 12. 029 3 和 2. 128 8,标准差为 2. 805 4,说明不同企业间碳解锁水平存在较大差异;数字化转型程度(*DT*)的最大值和均值分别为 5. 463 1 和 2. 539 3,标准差为 1. 164 4,同样表明企业间数字化转型水平差距较大。总体来看,尽管部分领先企业已具备较强的数字化能力,但仍有大量制造企业处于数字化转型的初级阶段。

表 3 主要变量描述性统计结果

变量	观测值	均值	中位数	标准差	最小值	最大值
<i>CUL</i>	10 677	2. 128 8	1. 400 0	2. 805 4	-5. 556 5	12. 029 3
<i>DT</i>	10 677	2. 539 3	2. 484 9	1. 164 4	0. 000 0	5. 463 1
<i>DTP</i>	10 677	1. 498 8	1. 386 3	1. 234 7	0. 000 0	4. 638 2
<i>DTB</i>	10 677	1. 138 7	1. 098 6	1. 034 6	0. 000 0	4. 248 5
<i>SIZE</i>	10 677	20. 879 3	20. 778 4	1. 487 3	17. 018 5	24. 378 9
<i>AGE</i>	10 677	2. 910 1	2. 944 4	0. 348 3	1. 609 4	3. 583 5

表3( 续)

变量	观测值	均值	中位数	标准差	最小值	最大值
LEV	10 677	0. 475 6	0. 486 0	0. 185 6	0. 063 6	0. 867 2
ROE	10 677	0. 049 4	0. 059 7	0. 146 5	-0. 765 8	0. 335 4
FIX	10 677	0. 259 0	0. 231 1	0. 151 8	0. 018 2	0. 630 5
TOP	10 677	0. 520 5	0. 517 3	0. 144 3	0. 226 7	0. 893 5
CAP	10 677	1. 904 2	1. 591 0	1. 290 5	0. 423 3	8. 509 5
EG	10 677	2. 748 7	2. 600 0	0. 906 1	0. 000 0	6. 800 0

五、实证结果与分析

( 一) 基准回归

表 4 展示了制造企业数字化转型对碳解锁影响的基准回归结果。其中,各列核心解释变量的回归系数均显著为正,说明数字化转型程度越高,制造企业碳解锁能力越强。不过,*DTP* 的回归系数相对较小,说明产品生产数字化转型的促进作用较弱。这可能是因为,传统机器设备相对能源消耗较大,而更新换代可能需要承担极大的沉没成本,这就导致许多制造企业更倾向于对原有设备进行数字化改造,从而限制了数字技术对制造企业碳解锁的赋能效应;商业运营数字化使企业可以通过线上营销、线上售卖的方式提高企业销售量,减少了不必要的运输、储存等物流成本,降低了能源消耗,因此会具有更强的赋能效应。根据以上结果,假设 1 得到验证。

表 4 基准回归结果

变量	( 1)	( 2)	( 3)
<i>DT</i>	0. 179 6 <sup>***</sup> ( 0. 037 8)		
<i>DTP</i>		0. 105 6 <sup>***</sup> ( 0. 039 4)	
<i>DTB</i>			0. 127 0 <sup>***</sup> ( 0. 033 8)
<i>SIZE</i>	0. 043 7 ( 0. 066 2)	0. 061 5 ( 0. 066 7)	0. 072 8 ( 0. 065 0)
<i>AGE</i>	0. 455 6 ( 0. 407 7)	0. 476 0 ( 0. 407 5)	0. 445 2 ( 0. 406 5)
<i>LEV</i>	-0. 779 4 <sup>***</sup> ( 0. 266 7)	-0. 789 4 <sup>***</sup> ( 0. 267 2)	-0. 802 5 <sup>***</sup> ( 0. 266 0)
<i>ROE</i>	0. 901 8 <sup>***</sup> ( 0. 165 4)	0. 901 2 <sup>***</sup> ( 0. 166 7)	0. 913 4 <sup>***</sup> ( 0. 165 4)

表4( 续)

变量	(1)	(2)	(3)
<i>FIX</i>	-0.995 5 ** (0.409 7)	-1.131 4 *** (0.407 0)	-1.126 1 *** (0.403 8)
<i>TOP</i>	1.271 7 *** (0.372 4)	1.296 7 *** (0.372 3)	1.274 0 *** (0.369 1)
<i>CAP</i>	0.019 9 (0.041 9)	0.017 8 (0.041 9)	0.020 3 (0.041 4)
<i>EG</i>	0.073 9 * (0.038 9)	0.074 3 * (0.038 9)	0.072 2 * (0.038 9)
常数项	-0.884 4 (1.742 7)	-0.987 5 (1.756 3)	-1.103 4 (1.744 3)
企业固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
观测值	10 677	10 677	10 677
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.739 0	0.738 1	0.738 5

注：\*\*\*、\*\*、\* 分别表示 1%、5% 和 10% 的显著性水平，括号内为聚类到企业层面的稳健标准误，后表同。

(二) 内生性分析

1. 工具变量法

本文采用工具变量法缓解模型中可能存在的内生性问题。首先,参考黄群慧等(2019)<sup>[53]</sup>的做法,选取全国互联网上网人数与 1984 年各地级市每百万人邮局数的交互项作为企业数字化转型的工具变量(*IV1*)。其次,借鉴方明月等(2022)<sup>[54]</sup>的做法,将企业所在地级市的数字化转型程度年度均值作为另一工具变量(*IV2*)。如表 5 所示,在工具变量检验方面,Kleibergen-Paap rk *LM* 统计量为 176.215,*P* 值小于 0.01,拒绝识别不足假设;Kleibergen-Paap rk Wald *F* 统计量为 368.377,超过 Stock-Yogo 检验中 10%的临界值(19.93),拒绝弱工具变量假设。工具变量法两阶段的回归结果表明选取的工具变量是合理、有效的,同时也说明了基准回归结论的可靠性。

表 5 工具变量法回归结果

变量	第一阶段		第二阶段		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>IV1</i>	0.044 9 ** (0.019 9)				
<i>IV2</i>		0.780 6 *** (0.021 6)			

表5(续)

变量	第一阶段		第二阶段		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>DT</i>			0.280 8*** (0.912 2)		
<i>DTP</i>				0.373 8*** (0.140 5)	
<i>DTB</i>					0.433 6*** (0.145 5)
常数项	-2.287 9*** (0.787 8)	-2.749 4*** (0.740 5)	-3.355 8* (1.858 4)	-2.790 6 (1.928 9)	-3.697 1* (1.891 5)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制
Kleibergen-Paap rk <i>LM</i>	176.215				
Kleibergen-Paap Wald rk <i>F</i>	368.377				
观测值	8 899	10 677	8 899	8 899	8 899
<i>R</i> <sup>2</sup>	0.735 9	0.798 1	0.744 0	0.739 9	0.738 5

2. 倾向得分匹配法<sup>①</sup>

倾向得分匹配(PSM)可有效降低因样本选择问题导致的内生性偏差。参考祝树金等(2023)<sup>[55]</sup>的做法,本文根据企业数字化转型程度将样本分为处理组和控制组。数字化转型程度高于样本均值则为处理组;反之,则为控制组。参照以往研究<sup>[56]</sup>的做法,选择前文的控制变量作为协变量。根据企业特征变量进行1:2近邻匹配,结果显示,除环境规制强度(*EG*)外,处理组和控制组的协变量不存在明显差异,说明使用PSM进行样本匹配是有效的。对匹配后的样本数据再次进行回归检验,结果显示,企业数字化转型与碳解锁之间仍存在促进关系,与基准回归结果一致。

(三) 稳健性检验<sup>②</sup>

本文参考甄红线等(2023)<sup>[49]</sup>对数字化转型词频的分类,统计该三大类词频出现的频率,并将关键词总词频加1后取自然对数,以此替换核心解释变量。结果显示,核心结论和基准回归结果一致。

考虑到北京市、上海市、天津市和重庆市经济建设起步早,且与地级市相比具有一定的政治特殊性,数字化转型对企业碳解锁的影响效应可能存在较大差异,本文将四个直辖市的数据剔除。结果显示,核心结论与基准回归结果一致。

此外,本文在总体样本中随机抽取80%和90%的样本,结果显示,核心结论仍与基准回归结果一致。

① 限于篇幅,省略具体回归结果,备案。  
② 限于篇幅,省略具体回归结果,备案。

( 四) 机制分析

表 6 列(1)为数字化转型对制造企业绿色创新竞争力影响的回归结果。其中,DT 的回归系数在 10%水平下显著为正,表明企业数字化转型可以提高绿色创新竞争力。本文根据绿色竞争力的中位数将样本分为强、弱两组。列(2)和列(3)结果显示,数字化转型对绿色竞争力强的制造企业碳解锁的赋能效果更强。由此可知,数字化转型通过提升绿色创新竞争力赋能制造企业碳解锁,即假设 2 得到验证。

表 6 列(4)为数字化转型对管理竞争力影响的回归结果。其中,DT 的回归系数在 5%水平下显著为正,表明企业数字化转型可以提高管理竞争力。本文根据企业管理竞争力的中位数将样本分为强、弱两组。列(5)和列(6)结果显示,数字化转型对管理竞争力强的制造企业碳解锁的赋能效果更强。由此可知,数字化转型通过提升管理竞争力赋能制造企业碳解锁,即假设 3 得到验证。

表 6 机制分析回归结果:绿色创新竞争力和管理竞争力

变量	绿色创新竞争力			管理竞争力		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DT	0.001 7 *	0.222 4 ***	0.171 5 ***	0.050 3 **	0.186 8 ***	0.137 7 **
	(0.001 0)	(0.067 8)	(0.044 0)	(0.024 4)	(0.044 1)	(0.057 4)
常数项	0.062 6	0.592 4	-0.877 6	0.632 3	-1.338 1	-0.474 1
	(0.051 5)	(2.923 3)	(1.925 3)	(0.909 6)	(2.006 3)	(2.295 0)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	10 166	3 464	7 120	10 677	6 848	3 774
R <sup>2</sup>	0.426 0	0.784 2	0.745 1	0.395 2	0.754 7	0.768 6

注:列(1)和列(4)的被解释变量分别为 GC 和 ICC,列(2)和列(3)分别为根据绿色创新竞争力强、弱分组的回归结果,列(5)和列(6)分别为根据管理竞争力强、弱分组的回归结果。

表 7 列(1)为数字化转型对企业经济竞争力影响的回归结果。其中,DT 的回归系数显著为正,表明数字化转型可以提高企业经济竞争力。本文根据企业竞争力的中位数将样本分为强、弱两组。列(2)和列(3)结果显示,数字化转型对经济竞争力强的制造企业碳解锁的赋能效果更强。由此可知,数字化转型可以通过提升经济竞争力来促进制造企业碳解锁。由此,假设 4 得到验证。

表 7 机制分析回归结果:经济竞争力

变量	(1)	(2)	(3)
DT	0.109 9 **	0.250 6 ***	0.094 3 *
	(0.055 9)	(0.050 2)	(0.053 9)

表7(续)

变量	(1)	(2)	(3)
常数项	-31.465 8*** (4.492 4)	-3.015 1 (2.222 8)	-2.328 4 (2.298 2)
控制变量	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制
观测值	10 677	5 389	5 246
R <sup>2</sup>	0.844 5	0.771 3	0.755 5

注:列(1)的被解释变量为EC,列(2)和列(3)分别为根据经济竞争力强、弱分组的回归结果。

(五)交互影响分析

融资约束作为交互变量的回归结果如表8列(1)所示,其中数字化转型的回归系数显著为正,数字化转型和融资约束交互项(DT×FC)的回归系数显著为负,表明缓解融资约束可以加强数字化转型对制造企业碳解锁的促进作用。由此,假设5得到验证。

表8 交互影响分析回归结果

变量	(1)	(2)
DT	0.168 2*** (0.043 0)	0.174 0*** (0.040 2)
DT×FC	-0.035 2*** (0.011 3)	
FC	0.030 2 (0.035 6)	
DT×GEC		0.224 8*** (0.075 2)
GEC		0.216 7** (0.099 6)
常数项	-0.351 3 (2.070 7)	-0.780 0 (1.785 4)
控制变量	控制	控制
企业固定效应	控制	控制
年份固定效应	控制	控制
观测值	10 145	9 640
R <sup>2</sup>	0.780 1	0.740 1

政府环境关注度作为交互变量的回归结果如表8列(2)所示,其中数字化转型以及数字化转型与政府环境关注度交互项(DT×GEC)的回归系数均显著为正,表明政府环境关注度可以促进数字化转型对制造企业碳解锁的正向影响。由此,假设6得到验证。

(六)异质性分析

1. 企业所有权性质

根据企业所有权性质将制造企业分为国有企业和非国有企业。表9列(1)和列(4)的回归结果显示,国有企业和非国有企业整体数字化转型的回归系数均显著为正。国有企业样本组的回归系数大于非国有企业样本组,组间系数差异检验的P值为0.084 0,这表明数字化转型对国有企业碳解锁的促进作用更强。表9列(2)和列(5)的回归结果显示,产品生产数字化转型对国有企业碳解锁具有促进作

用,但对非国有企业碳解锁并无明显影响。这可能是因为国有企业的所有制属性决定了其在碳减排中承担更多责任,是实现碳减排的重点单位。相比之下,对产品生产环节进行数字化改造通常需要投入大量资金,并伴随较高的沉没成本风险。在缺乏政府资金支持的情况下,非国有企业往往缺乏推进产品生产数字化转型的动力。

表 9 企业所有权性质异质性分析回归结果

变量	国有企业			非国有企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DT	0.219 3 *** (0.046 8)			0.142 9 ** (0.060 6)		
DTP		0.118 3 *** (0.043 9)			0.099 8 (0.066 1)	
DTB			0.101 1 ** (0.048 1)			0.127 9 *** (0.048 7)
常数项	-1.335 0 (1.884 4)	-1.341 6 (1.895 8)	-1.548 2 (1.886 7)	-0.835 1 (2.953 9)	-0.935 7 (2.975 5)	-0.910 4 (2.955 7)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	5 904	5 904	5 904	4 755	4 755	4 755
R <sup>2</sup>	0.748 8	0.747 3	0.747 1	0.751 4	0.751 0	0.751 5

2. 企业规模

制造企业数字化转型会受到企业规模的影响,本文根据制造企业资产中位数将企业分为大型制造企业和中小型制造企业。由表 10 可知,数字化转型能够赋能大型制造企业碳解锁,但对中小型制造企业碳解锁没有明显促进作用。这可能是因为大型制造企业资源整合能力强,拥有先进的数字技术、碳减排技术及管理模式等,能够快速有序地推进企业数字化转型,进而赋能企业碳解锁。中小型制造企业资金实力相对较弱,试错成本较高,往往采取跟从性策略,数字化转型进程缓慢。中小型制造企业的环境监管压力小,企业碳解锁动力不足。同时,中小型制造企业资金、人才以及技术等资源短缺,在没有外源力的支持下,推进数字化转型困难重重,难以有效发挥数字化转型对碳解锁的影响效应。

表 10 企业规模异质性分析回归结果

变量	大型企业			中小型企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DT	0.271 3 *** (0.049 7)			0.078 6 (0.055 5)		

表10(续)

变量	大型企业			中小型企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DTP		0.216 6*** (0.047 4)			0.025 1 (0.060 1)	
DTB			0.168 0*** (0.046 1)			0.048 2 (0.050 4)
常数项	2.599 8 (2.644 3)	2.439 0 (2.668 8)	1.953 1 (2.622 2)	-4.863 8* (2.694 6)	-5.046 8* (2.697 9)	-4.970 1* (2.687 1)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	5 312	5 312	5 312	5 314	5 314	5 314
R <sup>2</sup>	0.780 5	0.779 7	0.779 1	0.754 6	0.754 3	0.754 4

3. 企业资本密集度

根据资本密集度的中位数,本文将制造企业分为资本密集型企业 and 劳动密集型企业。由表 11 列(1)和列(4)可知,无论在资本密集型企业还是劳动密集型企业,DT 的回归系数均显著为正;资本密集型企业样本组的回归系数大于劳动密集型企业样本组,组间系数差异检验的 P 值为 0.067 6,表明数字化转型对资本密集型制造企业碳解锁的赋能效应更强。这可能是由于资本密集型制造企业面临更大的碳排放监管压力,更有动力进行数字化转型,进而赋能碳解锁。与劳动密集型制造企业相比,资本密集型制造企业更能获得政府政策的偏向性。另外,资本密集型制造企业更具有规模经济效应,数字化转型赋能企业碳解锁的回报率更高。由列(2)和列(5)可知,生产数字化转型对资本密集型企业碳解锁没有明显影响效应,但能够赋能劳动密集型企业碳解锁。这种差异可能是技术刚性所致。

表 11 企业资本密集度异质性分析回归结果

变量	资本密集型企业			劳动密集型企业		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DT	0.178 0*** (0.059 8)			0.175 3*** (0.043 4)		
DTP		0.094 7 (0.060 3)			0.145 8*** (0.039 6)	
DTB			0.130 1** (0.054 1)			0.111 8*** (0.040 5)
常数项	0.062 4 (3.069 7)	0.053 0 (3.087 7)	0.166 4 (3.081 5)	-2.389 2 (1.844 3)	-2.489 8 (1.831 7)	-2.931 9 (1.839 1)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
企业固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制

表11( 续)

变量	资本密集型企业			劳动密集型企业		
	( 1)	( 2)	( 3)	( 4)	( 5)	( 6)
年份固定效应	控制	控制	控制	控制	控制	控制
观测值	5 270	5 270	5 270	5 325	5 325	5 325
$R^2$	0. 758 6	0. 757 8	0. 758 2	0. 783 4	0. 783 0	0. 782 7

六、结论与建议

从碳锁定到碳解锁需要综合技术和制度体系,本文探究了数字化转型赋能制造企业碳解锁的路径、异质性以及内外部环境的协同效应。首先,从整体上看,数字化转型可以赋能制造企业从碳锁定到碳解锁。从不同维度看,产品生产数字化转型和商业运营数字化转型对碳解锁均具有推动作用,但前者的碳解锁赋能效应较弱。其次,从作用渠道上来看,数字化转型主要通过提升企业竞争力实现碳解锁赋能效应,其中提高经济竞争力不仅产生直接解锁效应,还可以通过提高绿色创新竞争力和管理竞争力等渠道产生碳解锁的间接效应。在碳解锁过程中,内部融资约束的缓解和外部政府环境关注的提升均能强化制造企业数字化转型的解锁效应。最后,数字化转型的碳解锁效应存在异质性,即数字化转型能够赋能大型制造企业碳解锁,而对中小型制造企业碳解锁没有促进作用。另外,在国有企业、大型企业和劳动密集型制造企业中,产品生产数字化转型可以有效促进企业碳解锁,在非国有企业、中小企业和资本密集型制造企业中,这种影响效应并不明显。

基于研究结果,本文提出如下政策建议:

第一,将数字化转型嵌入企业发展规划中,制定系统化、可实施的转型方案。一方面,对于有能力实现数字化转型的企业,应充分利用数字技术监测能耗和碳排放数据,优化制造企业生产流程,尽可能放大碳解锁效应。另一方面,对于数字化转型困难的企业,政策制定者需要对其进行技术和资金支持,通过建立政府-企业的协同机制帮助企业循序渐进完成产品生产数字化转型。

第二,强化制造企业数字化转型赋能碳解锁的传导路径。首先,制造企业应增加绿色技术研发投资,提升绿色竞争力。其次,企业应利用数字技术构建智能化管理平台,优化资源配置,强化内部控制与风险识别能力,避免因管理失效出现“黑天鹅”事件。最后,制造企业可利用数字平台创新商业模式,提高市场占有率,提升经济竞争力。只有从绿色技术、内部管理和经济收益等多维度发力,才能为制造企业打破碳锁定提供有效支撑。

第三,强化“资金-技术-监管”三位一体的碳解锁机制。其一,要利用金融科技等手段合理识别有潜力的数字化转型企业,减少金融机构和企业之间的信息不对称,提升绿色信贷的普惠性,降低融资成本。其二,要加强财政、金融、环保部门的政策协同,形成金融支持的“拉力”和环境规制“推力”的有效结合,从而实现“资金-技术-监管”三位一体的碳解锁机制。

第四,针对不同企业制定差异化的碳解锁策略。首先,要充分发挥国有企业和大型企业数字化转型实现碳解锁的示范标杆效应,总结推广其成功经验与技术路径。其次,鼓励非国有企业和中小企业结合自身实际,借鉴先进经验,循序渐进地推动数字化转型并实现企业碳解锁。最后,对于资本密集型企业,需要考虑数字化技术的适配性,合理评估现有设备的数字化改造成本和潜在收益,避免“一刀切”的数字改造运动;而对于劳动密集型企业,需要加大数字设备的投入,发挥数字化投资的碳解锁效应。

## 参考文献:

- [1] SUN H W, TANG C L, GAO P, et al. Digital economy, energy consumption and urban carbon emission reduction: empirical evidence from 278 cities in China[J]. *Sustainable Futures*, 2025, 10: 100858.
- [2] ZHAO Y C, FENG Y, SHEN J, et al. Can market-oriented environmental regulation achieve synergistic reduction of atmospheric pollution and carbon emissions? Evidence from China's carbon emissions trading policy[J]. *Cleaner Environmental Systems*, 2025, 18: 100299.
- [3] 夏学超, 孙慧, 祝树森, 等. 多元主体环境规制组合如何实现降碳减污扩绿增长协同推进? [J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(8): 22-35.
- [4] UNRUH G C. Understanding carbon lock-in[J]. *Energy Policy*, 2000, 28(12): 817-830.
- [5] 董康银, 赵丛雨, 董秀成. 新能源示范城市试点政策对企业碳锁定的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2025, 35(2): 41-54.
- [6] XING Z Y, HUANG J, WANG J. Unleashing the potential: exploring the nexus between low-carbon digital economy and regional economic-social development in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 413: 137552.
- [7] XU X Y, LEI L Y. Digital economic development, financial literacy and household cultural consumption[J]. *Finance Research Letters*, 2025, 83: 107687.
- [8] YANG Z, GAO W J, HAN Q, et al. Digitalization and carbon emissions: how does digital city construction affect China's carbon emission reduction? [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 87: 104201.
- [9] NIE C F, XIE L, FENG Y. The digital path to carbon neutrality: examining the carbon abatement effect of digital place-based policy in China[J]. *Energy Economics*, 2025, 147: 108537.
- [10] GUO B N, WANG Y, ZHANG H, et al. Impact of the digital economy on high-quality urban economic development: evidence from Chinese cities [J]. *Economic Modelling*, 2023, 120: 106194.
- [11] 王海花, 谭钦瀛, 李烨. 数字技术应用、绿色创新与企业可持续发展绩效——制度压力的调节作用[J]. *科技进步与对策*, 2023, 40(7): 124-135.
- [12] 钟军委, 李雨欣, 赵卓娅. 中国绿色税制对区域经济“碳锁定”的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(8): 13-21.
- [13] ZHAO C Y, DONG K Y, WANG K, et al. How can Chinese cities escape from carbon lock-in? The role of low-carbon city policy[J]. *Urban Climate*, 2023, 51: 101629.
- [14] FABER L, BUSCH H, LEFSTAD L. A Trojan horse for climate policy: assessing carbon lock-ins through the Carbon Capture and Storage-Hydrogen-Nexus in Europe[J]. *Energy Research & Social Science*, 2025, 120: 103881.
- [15] ZHAO C Y, ZHONG C, LIU C X, et al. How the digital economy is empowering green strategies for breaking carbon lock-in[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121670.
- [16] 程娜, 桑一铭, 李博文. “双碳”目标下中国“碳解锁”发展研究[J]. *改革*, 2023(12): 151-162.
- [17] ZHAO C Y, MA X Y, CHE S, et al. Does climate aid alleviate carbon lock-in? A global perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 449: 141782.
- [18] DRAGAN W, ZDYRKO A. The spatial dimension of coal phase-out: exploring economic transformation and city pathways in Poland[J]. *Energy Research & Social Science*, 2023, 99: 103058.
- [19] UNRUH G C. Escaping carbon lock-in[J]. *Energy Policy*, 2002, 30(4): 317-325.
- [20] VAN DER LOOS H Z A, NEGRO S O, HEKKERT M P. Low-carbon lock-in? Exploring transformative innovation policy and offshore wind energy pathways in the Netherlands[J]. *Energy Research & Social Science*, 2020, 69: 101640.
- [21] 黄晶. 碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展的几点研判[J]. *中国人口·资源与环境*, 2023, 33(1): 100.
- [22] GIELEN D, BOSHELL F, SAYGIN D, et al. The role of renewable energy in the global energy transformation[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2019, 24: 38-50.
- [23] 肖红军, 沈洪涛, 周艳坤. 客户企业数字化、供应商企业 ESG 表现与供应链可持续发展[J]. *经济研究*, 2024, 59(3): 54-73.
- [24] 杨昕, 赵守国. 数字经济赋能区域绿色发展的低碳减排效应[J]. *经济与管理研究*, 2022, 43(12): 85-100.
- [25] YI M, LIU Y F, SHENG M S, et al. Effects of digital economy on carbon emission reduction: new evidence from China[J]. *Energy Policy*, 2022, 171: 113271.

- [26] HU J, ZHANG H, IRFAN M. How does digital infrastructure construction affect low-carbon development? A multidimensional interpretation of evidence from China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 396: 136467.
- [27] TANG K J, YANG G Y. Does digital infrastructure cut carbon emissions in Chinese cities? [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2023, 35: 431-443.
- [28] 李肆, 胡佳霖, 王熙. 全球视域下数字经济发展的碳减排效应及其作用机制[J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(8): 3-12.
- [29] 焦志伦, 李雯雯, 刘秉镰. 数字经济发展必然减少行业碳排放吗? ——来自物流业的新证据[J]. *南开经济研究*, 2024(6): 110-128.
- [30] 汪旭晖, 谢寻. 数字科技创新引领物流业绿色低碳转型的机制与路径——基于京东物流的案例研究[J]. *经济与管理研究*, 2024, 45(5): 21-40.
- [31] 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.
- [32] SETHI V, KING W R. Development of measures to assess the extent to which an information technology application provides competitive advantage [J]. *Management Science*, 1994, 40(12): 1601-1627.
- [33] 韩晶, 姜如玥. 数字经济赋能低碳发展: 理论逻辑与实践路径[J]. *统计研究*, 2024, 41(4): 54-67.
- [34] QIAO P H, LIU S T, FUNG H G, et al. Corporate green innovation in a digital economy[J]. *International Review of Economics & Finance*, 2024, 92: 870-883.
- [35] LI X Y, XU Y Z, TAN H X, et al. Low-carbon city pilot policies and urban carbon productivity improvement: an empirical analysis from the perspective of green competitiveness[J]. *Environmental and Sustainability Indicators*, 2024, 24: 100531.
- [36] ZHANG H, GENG Z R, YIN R S, et al. Regional differences and convergence tendency of green development competitiveness in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 119922.
- [37] 戚聿东, 肖旭. 数字经济时代的企业管理变革[J]. *管理世界*, 2020, 36(6): 135-152.
- [38] 甘行琼, 许启凡, 邹甘娜, 等. 智能制造促进了制造业低碳转型与稳增长协同发展吗? [J]. *经济学动态*, 2025(7): 77-95.
- [39] 王欣, 王梅知. 新时代国有企业核心竞争力的构成要素、现实基础与提升方略[J]. *改革*, 2025(2): 49-61.
- [40] 潘艺, 张金昌. 数字化转型与企业竞争力: 契机还是危机? ——来自中国 A 股上市企业的经验证据[J]. *产业经济研究*, 2023(3): 87-99.
- [41] LE T T, IKRAM M. Do sustainability innovation and firm competitiveness help improve firm performance? Evidence from the SME sector in Vietnam [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2022, 29: 588-599.
- [42] 赵涛, 张智, 梁上坤. 数字经济、创业活跃度与高质量发展——来自中国城市的经验证据[J]. *管理世界*, 2020, 36(10): 65-76.
- [43] 杨宜, 刘祖娴, 赵睿. 金融发展促进了专精特新企业创新转化吗? [J]. *经济与管理研究*, 2025, 46(5): 56-69.
- [44] CHEN J Y, ZHU D D, DING S J, et al. Government environmental concerns and corporate green innovation: evidence from heavy-polluting enterprises in China[J]. *Business Strategy and the Environment*, 2024, 33(3): 1920-1936.
- [45] LI D L, ZHOU Z H, CAO L J, et al. What drives the change in China's provincial industrial carbon unlocking efficiency? Evidence from a geographically and temporally weighted regression model[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 158971.
- [46] ZHAO C Y, WANG J D, DONG K Y, et al. How does renewable energy encourage carbon unlocking? A global case for decarbonization[J]. *Resources Policy*, 2023, 83: 103622.
- [47] ZHAO F F, HU Z, ZHAO X. Multi-scenario prediction and path optimization of industrial carbon unlocking in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 421: 138534.
- [48] SHANG Y P, RAZA S A, HUO Z, et al. Does enterprise digital transformation contribute to the carbon emission reduction? Micro-level evidence from China[J]. *International Review of Economics & Finance*, 2023, 86: 1-13.
- [49] 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.
- [50] 甄红线, 王玺, 方红星. 知识产权行政保护与企业数字化转型[J]. *经济研究*, 2023, 58(11): 62-79.
- [51] 赵宸宇, 王文春, 李雪松. 数字化转型如何影响企业全要素生产率[J]. *财贸经济*, 2021, 42(7): 114-129.
- [52] 梁上坤, 董青. 管理层宏观经济认知与企业违约风险[J]. *数量经济技术经济研究*, 2023, 40(9): 200-220.
- [53] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. *中国工业经济*, 2019(8): 5-23.
- [54] 方明月, 林佳妮, 聂辉华. 数字化转型是否促进了企业内共同富裕? ——来自中国 A 股上市公司的证据[J]. *数量经济技术经济研究*, 2022, 39(11): 50-70.
- [55] 祝树金, 申志轩, 文茜, 等. 经济政策不确定性与企业数字化战略: 效应与机制[J]. *数量经济技术经济研究*, 2023, 40(5): 24-45.
- [56] 范合君, 吴婷, 何思锦. 企业数字化的产业链联动效应研究[J]. *中国工业经济*, 2023(3): 115-132.

## How does Digital Transformation Drive Manufacturing Enterprises from Carbon Lock-in to Carbon Unlocking?

CHEN Zhenling, WANG Xueting, YE Qing

(Beijing Technology and Business University, Beijing 100048)

**Abstract:** Breaking the high-carbon lock-in of manufacturing enterprises and enhancing their carbon unlocking capability are key steps in promoting China's low-carbon economic transition. This paper integrates digital transformation, enterprise competitiveness, internal and external environmental factors, and carbon unlocking capability into a unified analytical framework to explore the internal mechanism through which digital transformation empowers carbon unlocking in manufacturing enterprises.

Using panel data of China's listed manufacturing enterprises from 2008 to 2023, this paper empirically examines the impact of digital transformation on carbon unlocking, including the direct effect, mechanisms, interaction effects, and heterogeneity. Furthermore, based on the characteristics of digital transformation, it investigates the impacts of the digitalization of product production and business operations on carbon unlocking in manufacturing enterprises.

The empirical results are as follows. (1) Overall, digital transformation effectively enhances the carbon unlocking capability of manufacturing enterprises. The digitalization of product production and business operations also exerts positive impacts, while the enabling effect of the former is relatively weaker. (2) Digital transformation facilitates carbon unlocking by strengthening enterprise competitiveness. Specifically, the improvement in economic competitiveness directly promotes carbon unlocking and also indirectly enhances it by reinforcing green innovation competitiveness and managerial competitiveness. In addition, easing financing constraints and increasing government environmental attention can further strengthen the positive effect of digital transformation on carbon unlocking. (3) Heterogeneity analysis shows that digital transformation can only empower carbon unlocking in large manufacturing enterprises. Compared with non-state-owned and labor-intensive manufacturing enterprises, state-owned and capital-intensive ones experience stronger promoting effects of digital transformation on carbon unlocking. Moreover, the digitalization of product production enhances carbon unlocking in state-owned, large, and labor-intensive enterprises.

This paper provides insights for developing policies that promote digital transformation and carbon unlocking in the manufacturing sector. The government should actively encourage and guide manufacturing enterprises to accelerate their digital transformation, promote the construction of digital infrastructure, introduce supportive policies, and implement incentive measures to lower the costs and risks associated with digital transformation. Moreover, targeted and precise policy support should be adopted to enhance policy adaptability and ensure the smooth implementation of digital initiatives across the manufacturing sector. The government should also leverage the exemplary role of state-owned and large enterprises to advance digital transformation across all dimensions of enterprise operations, break carbon lock-in, harness the dividends of the digital economy, and drive high-quality, sustained industrial development.

**Keywords:** digital transformation; carbon unlocking; manufacturing enterprise; competitiveness empowerment; financing constraints; government environmental attention

责任编辑:蒋 琰