

数字技术嵌入制造业环节偏好对碳排放的影响

王梦情

浙江理工大学经济管理学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年2月28日; 发布日期: 2025年4月15日

摘要

为探究数字技术嵌入制造业不同环节对碳排放的影响, 识别了数字技术嵌入制造业环节偏好。研究发现: 第一, 数字技术嵌入制造业环节偏好与碳排放的关系曲线呈现“U型”, 制造业中游环节嵌入数字技术, 更有利于其减少碳排放。第二, 成本效应和创新效应对两者“U型”关系的调节作用比较显著。相关结论为产业优化数字技术应用, 更大化降低碳排放提供了新视角。

关键词

数字技术, 嵌入制造业环节偏好, 碳排放, 投入产出

The Influence of Digital Technology Embedding Manufacturing Link Preference on Carbon Emissions

Mengqing Wang

School of Economics and Management, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Feb. 28th, 2025; published: Apr. 15th, 2025

Abstract

To explore the impact of digital technology embedded in different segments of the manufacturing industry on carbon emissions, the preference for digital technology embedded in manufacturing segments was identified. It is found that, firstly, the relationship between the preference for digital technology embedded in the manufacturing industry and carbon emission shows a U-shape, and the embedding of digital technology in the midstream of the manufacturing industry is more conducive to reducing carbon emission. Secondly, the cost effect and innovation effect moderated the U-shaped relationship more significantly. The findings provide new perspectives for the industry to

optimize the application of digital technology to reduce carbon emissions.

Keywords

Digital Technology, Embedded Manufacturing Link Preference, Carbon Emission, Input-Output

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

制造业生产活动作为各国保持经济持续增长的主要动力，其过程伴随着大量的资源消耗与污染排放。如何在实现制造业高质量发展的同时，减少能源消耗与碳排放量，成为了各个国家关注的一个问题。在此背景下，数字技术在资源及环境等领域的创新应用，使其在减少碳排放目标方面所发挥的作用越发受到瞩目。数字技术正不断渗透到各个领域[1]，其中，对制造业的影响尤为突出。

当前，理论界关于数字技术对碳排放影响的研究有不少，主要集中于数字技术应用程度对制造业碳排放的影响。学界发现，数字技术应用程度提高有助于制造业减少碳排放[2]。但这些文献对于数字技术嵌入制造业上游、中游还是下游环节才能更有效地降低碳排放这一问题尚未有结论。基于国家低碳高质量发展的现实需要，从数字技术融入制造业不同环节的视角来探讨数字技术对制造业碳排放的影响，具有重要意义。

2. 理论分析

从产业链视角来看，制造业中游环节不仅承包着零件制造、产品加工等核心工作，更是连接上游、下游环节的重要枢纽[3]。制造业中游环节的碳排放量通常占据整个产业链排放的 40%~60% [4]。因此，中游环节的碳排放直接影响整条产业链的减排绩效。数字技术嵌入中游环节时，数字化能源管理系统的应用使生产过程能够被实时监控，通过数据采集实现生产优化调度[5]。同时，通过数字孪生技术的使用，可以预测生产情况，制定更好的能源方案，以减少上游供应环节和下游流通环节对化石能源消费的依赖。这些方式都能避免非必要的能源消耗，实现碳排放量的下降。当数字技术过分嵌入产业链两端时，则容易产生技术迟滞和减排效率低下的问题。一方面，数字技术嵌入上游环节时，新技术的研发需要大量的成本[6]，这在一定程度上会导致能源的消耗，反而可能导致碳排放增加。其次，数字技术嵌入下游环节时，数字技术在销售流通中发挥作用。但是，这个阶段侧重于数据的搜集，碳排放减少的实施空间有限。

综上所述，数字技术偏向中游环节嵌入制造业能最大化地发挥其减排作用，且中游环节的低碳发展会倒逼上游环节提供清洁产品，同时助推下游环节低碳化转型，这有利于制造业实现全产业链的减排目标。基于上述分析，提出假说：数字技术嵌入制造业环节偏好对碳排放的影响呈“U 型”，制造业中游环节嵌入数字技术，更有利于其减少碳排放。

3. 指标测算

3.1. 碳排放

参考已有研究，利用世界投入产出模型的方法来测算各国各行业的碳排放[7]，以完全碳排放强度衡量制造业碳排放绩效。

首先, 令 Y^w 为总产出, $F^w = [F^1 \ F^2 \ \dots \ F^g]^T$ 为最终需求, A^{gg} 为国家 g 直接消耗系数, 根据世界投入产出模型, 可得:

$$Y^w = \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ \vdots \\ Y^g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^{11} & A^{12} & \dots & A^{1g} \\ A^{21} & A^{22} & \dots & A^{2g} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{g1} & A^{g2} & \dots & A^{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ \vdots \\ Y^g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F^1 \\ F^2 \\ \vdots \\ F^g \end{bmatrix} \quad (1)$$

其次, 设 Car_j^g 是国家 g 行业 j 的二氧化碳排放量, 得到碳排放系数 d_j^g 为:

$$d_j^g = \frac{Car_j^g}{Y_j^g} \quad (2)$$

最后, 令各国家各行业的碳排放的系数矩阵 D 为:

$$D = [d_1^1, d_2^1, \dots, d_j^1; d_1^2, d_2^2, \dots, d_j^2; \dots; d_1^g, d_2^g, \dots, d_j^g] = [d^1, d^2, \dots, d^g] \quad (3)$$

因此, 单位最终产出的碳排放量 $Carbon^w$ 为:

$$Carbon^w = DL = \left(\sum_{m=1}^g d^m l^{mn} \right)_{1 \times g} \quad (4)$$

其中, L 为列昂惕夫逆矩阵, $\sum_{m=1}^g d^m l^{mn} = Ci_{git}$ 是各国各行业单位最终产出的碳排放量。

3.2. 数字技术嵌入制造业环节偏好

以数字技术投入与制造业最终产品的距离来衡量数字技术嵌入制造业环节偏好[8]。封闭状态下, 数字技术产业 s 的总产出(Y_s)等于其存货变动额(I_s)、作为制造业中间品的金额(Z_s)、作为非制造业中间品的金额(L_s)与最终需求(F_s)之和[9]。其中数字技术产业包括: 计算机、电子和光学产品的制造(C26)、电信服务业(J61)、计算机软件设计、咨询和信息服务业(J62、J63) [10]。

$$Y_s = I_s + L_s + Z_s + F_s \quad (5)$$

首先, 假定制造业 j 生产单位产品需要数字技术业 s 的中间投入为 d_{sj} :

$$Y_s - I_s - L_s = F_s + Z_s = F_s + \sum_{j=1}^N d_{sj} (Y_j - I_j - L_j) \quad (6)$$

其中, N 为制造业行业数。其次, 考虑制造业 j 的产品也会被其他制造业 k 、 l 作为中间品吸收时, 数字技术行业的投入产出模型扩展为:

$$Y_s - I_s - L_s = F_s + \sum_{j=1}^N d_{sj} F_j + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N d_{sk} d_{kj} F_j + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N d_{sl} d_{lk} d_{kj} F_j + \dots \quad (7)$$

上式中, 等号右侧代表各个独立生产环节。测算的数字技术嵌入制造业环节的平均偏好 Dig_s 以上述生产环节至最终产品的平均距离表示, 即:

$$Dig_s = 1 \times \frac{F_s}{Y_s - I_s - L_s} + 2 \times \frac{\sum_{j=1}^N d_{sj} F_j}{Y_s - I_s - L_s} + 3 \times \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N d_{sk} d_{kj} F_j}{Y_s - I_s - L_s} + 4 \times \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N d_{sl} d_{lk} d_{kj} F_j}{Y_s - I_s - L_s} + \dots \quad (8)$$

最后, 将上式进行线性化处理, 其中 U_j 为制造业 j 的上游度, 数字技术嵌入制造业环节偏好为:

$$Dig_s = 1 + \sum_{j=1}^N \frac{d_{sj} (Y_j - I_j - L_j)}{Y_s - I_s - L_s} U_j \quad (9)$$

4. 实证研究

4.1. 基准模型设定

理论分析认为，数字技术嵌入制造业中游环节更有利于实现产业减排，数字技术嵌入制造业环节偏好与碳排放间呈非线性关系。因此建立如下基准模型：

$$Ci_{gjt} = \alpha_0 + \beta_1 Dig_{gt} + \beta_2 Dig_{gt}^2 + \gamma X_{gjt} + \lambda_g + \eta_j + \delta_t + \varepsilon_{gjt} \quad (10)$$

其中，下标 g 代表国家， j 代表行业， t 代表时间； Ci_{gjt} 表示 g 国家 j 行业在 t 年份的碳排放； Dig_{gt} 、 Dig_{gt}^2 为 g 国家在 t 年份的数字技术嵌入制造业环节偏好及其平方项； X_{gjt} 表示控制变量； λ_g 、 η_j 、 δ_t 分别表示国家、行业、时间固定效应； ε_{gjt} 为随机扰动项； α 、 β 、 γ 为回归系数。

4.2. 其他变量选取

参考已有研究[10]，选取的控制变量如下：经济发展水平：国内生产总值(GDP)；外商直接投资：外商直接投资占 GDP 的百分比；研发强度：研发支出占 GDP 的百分比；要素禀赋结构：行业资本存量与其从业人数之比；人均产出：行业总产出与其从业人数之比；贸易开放度：行业总出口与总产出之比；能源消费结构：可再生能源消费与总能源消费之比。

4.3. 数据来源及描述性统计

主要来源数据库：经济合作发展组织(OECD)、世界投入产出(WIOD)和世界银行(WDI)数据库。由于 WIOD 数据库子环境账户的碳排放数据只更新至 2014 年，故研究样本为：2000~2014 年的 40 个国家 16 个制造业行业。主要变量的统计性描述见表 1。

Table 1. Descriptive statistics

表 1. 描述性统计

变量	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放	9520	0.336	0.743	0.002	4.986
数字技术嵌入制造业环节偏好	9520	1.205	0.246	1.006	2.478
经济发展水平	9520	26.590	1.740	22.730	30.430
外商直接投资	9520	7.792	23.450	-4.326	193.000
研发强度	8848	1.471	0.918	0.236	3.705
要素禀赋结构	9517	1.232	5.921	0.001	45.200
人均产出	9517	2.111	10.040	0.002	77.270
贸易开放度	9520	0.327	0.205	0.009	0.825
能源消费结构	9520	0.060	0.152	0.000	0.718

4.4. 基准回归结果

如表 2 显示，数字技术嵌入制造业环节偏好的二次项(Dig^2)系数显著为正，数字技术嵌入制造业环节偏好和碳排放之间呈现显著的“U 型”关系。这证实了前文理论分析提出的假说，制造业中游环节嵌入数字技术更利于减少碳排放。

Table 2. Benchmark regression results
表 2. 基准回归结果

变量	碳排放 C_i	
Dig	-1.602*** (-2.847)	-1.655*** (-2.957)
Dig^2	0.413*** (3.040)	0.446*** (3.124)
常数项	51.086*** (3.359)	62.317*** (3.569)
控制变量	Yes	Yes
国家、年份固定	Yes	Yes
行业固定	No	Yes
N	8845	8845
R^2	0.131	0.538

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的水平上显著；()内为聚类标准误；N 为样本量； R^2 为拟合优度；下表同。

4.5. 稳健性检验

4.5.1. 更换被解释变量

使用直接碳排放强度，即行业二氧化碳排放量与产出的比值作为被解释变量，进行稳健性分析。表 3 结果显示，数字技术嵌入制造业环节偏好的二次项系数依然在 1%的水平上显著为正，说明两者的“U 型”关系具有一定的稳健性。

4.5.2. 处理内生性问题

以数字技术嵌入制造业环节偏好及其平方项的一阶滞后项作为工具变量。通过检验，Cragg-Donald Wald F 估计量远大于 Stock-Yogo 检验的 10%临界值，工具变量与内生变量具有强相关性，有效避免了弱工具变量的问题。表 3 结果显示，数字技术嵌入制造业环节偏好的二次项系数仍显著为正，证实了其碳排放之间的“U 型”关系。

Table 3. Robustness test
表 3. 稳健性检验

项目	更换被解释变量	一阶滞后项
Dig	-1.231*** (-2.751)	-1.536** (-2.707)
Dig^2	0.337*** (2.810)	0.410*** (2.861)
常数	51.423*** (3.788)	57.759*** (3.006)
控制变量	Yes	Yes
国家、年份、行业固定	Yes	Yes

续表

Stock-Yogo 10%		16.380
Cragg-Donald Wald F		14073.040
<i>N</i>	8845	8273
R ²	0.600	0.531

5. 进一步分析

上文提及的“U 型”关系是否会受到某些因素干扰而发生改变？借助调节效应模型，考察生产效应、创新效应对数字技术嵌入制造业环节偏好与碳排放关系的调节作用。设定模型具体如下：

$$Ci_{gjt} = \alpha_0 + \beta_1 Dig_{gt} + \beta_2 Dig_{gt}^2 + \beta_3 M_{gjt} + \beta_4 M_{gjt} \times Dig_{gt} + \beta_5 M_{gjt} \times Dig_{gt}^2 + \gamma X_{gjt} + \lambda_g + \eta_j + \delta_t + \varepsilon_{gjt} \tag{11}$$

其中， M_{gjt} 为调节变量、 $M_{gjt} \times Dig_{gt}$ 为调节变量与解释变量的交互项、 $M_{gjt} \times Dig_{gt}^2$ 为调节变量与解释变量平方项的交互项。选取的调节变量具体为：生产效应，用各行业增加值与总工作时长的比值表示[11]。创新效应，用行业增加值将专利申请量进行标准化[12]。其他符号定义见公式(10)。

调节效应检验结果如表 4 所示。数字技术嵌入制造业环节偏好及其二次型的系数符号与前文一致且通过了显著性检验，说明加入交叉项并没有改变数字技术嵌入制造业环节偏好对碳排放的作用方向。生产效应与创新效应的二次项交互项系数都显著，且使得“U”型曲线变得陡峭，即生产效应与创新效应对两者的“U 型”关系有显著的调节作用。

Table 4. Moderating effects test
表 4. 调节效应检验

变量	生产效应	创新效应
<i>Dig</i>	-3.580*** (-2.859)	-2.089*** (-3.317)
<i>Dig</i> ²	1.156*** (2.741)	0.607*** (3.718)
<i>M</i>	-0.981** (-2.208)	-0.437*** (-2.989)
<i>M</i> × <i>Dig</i>	1.419** (2.236)	0.554*** (2.720)
<i>M</i> × <i>Dig</i> ²	-0.473** (-2.256)	-0.200*** (-3.187)
常数	63.333** (2.665)	85.575*** (4.404)
控制变量	Yes	Yes
国家、年份、行业固定	Yes	Yes
<i>N</i>	8605	8395
R ²	0.544	0.558

6. 结论与政策启示

本研究通过分析数字技术嵌入制造业环节偏好与碳排放的关系,得出以下主要结论:一是数字技术嵌入制造业环节偏好与碳排放之间存在显著的“U型”非线性关系。二是生产效应和创新效应对两者关系具有显著的调节作用。

基于研究结论,本文提出以下政策建议:第一,聚焦制造业中游环节的数字技术嵌入。政府可以通过数字化转型费用加计扣除政策引导数字技术资源向中游生产环节倾斜。第二,强化生产效率提升和创新能力优化的协同作用。有关部门可以联合企业建立数字化转型示范项目,提升中游环节企业数字化能源管理系统的应用经验。同时,设立绿色技术研发基金,提升财政补贴力度,支持企业开展低碳工艺创新。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨丹辉, 胡雨朦. 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, 2022(4): 77-93.
- [3] 白仲林, 李政, 付龔钰. 我国制造业产业链关键环节辨识[J]. 上海经济研究, 2024(4): 63-79.
- [4] Ding, S., Xu, N., Ye, J., Zhou, W. and Zhang, X. (2020) Estimating Chinese Energy-Related CO₂ Emissions by Employing a Novel Discrete Grey Prediction Model. *Journal of Cleaner Production*, **259**, Article ID: 120793. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120793>
- [5] 王和勇, 莫佳丽. 工业互联网对制造企业提质增效的影响研究[J]. 工业技术经济, 2022, 41(12): 28-37.
- [6] 余江, 孟庆时, 张越, 等. 数字创新: 创新研究新视角的探索及启示[J]. 科学学研究, 2017, 35(7): 1103-1111.
- [7] 黄玉霞, 谢建国. 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, 2019, 40(8): 100-115.
- [8] Antràs, P., Chor, D., Fally, T. and Hillberry, R. (2012) Measuring the Upstreamness of Production and Trade Flows. *American Economic Review*, **102**, 412-416. <https://doi.org/10.1257/aer.102.3.412>
- [9] 陈晓华, 刘慧, 蒋丽. 生产性服务资源环节偏好与中间品进口——来自 34 国 1997-2011 年投入产出数据的经验证据[J]. 财贸经济, 2019, 40(3): 101-115.
- [10] 刘洋, 董久钰, 魏江. 数字创新管理: 理论框架与未来研究[J]. 管理世界, 2020, 36(7): 198-217, 219.
- [11] 徐铮, 周晓旭. 制造业数字化投入、产业类型差异与全球价值链分工地位提升——基于全球投入产出数据的实证检验[J]. 科技进步与对策, 2024, 41(13): 67-78.
- [12] 陈凤兰, 张鹏飞. 国内生产链延伸发展与企业创新: 效应及作用机制[J]. 国际贸易问题, 2022(11): 69-86.