

长江经济带下数字经济赋能制造业绿色低碳转型升级路径研究

黄 薇

江苏大学财经学院, 江苏 镇江

收稿日期: 2025年2月17日; 录用日期: 2025年2月27日; 发布日期: 2025年3月31日

摘要

本文以长江经济带沿线11个省份的制造业为对象, 计算其2013~2022年的碳排放量, 设计长江经济带制造业绿色发展水平评价指标体系和数字经济发展水平评价指标体系, 并运用熵权法确定各个指标的权重。在此基础上构建数字经济发展水平、制造业发展水平和碳排放量之间的调节效应模型, 实证检验了数字经济发展、制造业发展与碳排放三者的关系。研究结果表明: 2013~2022年长江经济带沿线11个省份的制造业呈良好发展态势, 但碳排量总体上呈上升趋势, 且两者存在正相关, 但数字经济能够减弱和抑制这种正向关联, 起到显著的调节作用。

关键词

数字经济, 长江经济带, 制造业, 绿色低碳转型升级

Research on the Path of Green and Low-Carbon Transformation and Upgrading of Manufacturing Industry Empowered by the Digital Economy under the Yangtze River Economic Belt

Wei Huang

School of Finance and Economics of Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

Received: Feb. 17th, 2025; accepted: Feb. 27th, 2025; published: Mar. 31st, 2025

Abstract

This paper calculates the carbon emissions of the manufacturing industry in 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022, designs the evaluation index system of the green development level of the manufacturing industry and the evaluation index system of the development level of the digital economy in the Yangtze River Economic Belt, and uses the entropy weight method to determine the weight of each index. On this basis, a moderating effect model among the development level of the digital economy, the development level of the manufacturing industry and the carbon emission is constructed, and the relationship among the development of the digital economy, the development of the manufacturing industry and carbon emissions is empirically tested. The results show that from 2013 to 2022, the manufacturing industry in 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt showed a good development trend, but the carbon emissions generally showed an upward trend, and there was a positive correlation between the two, but the digital economy could weaken and inhibit this positive correlation and play a significant moderating role.

Keywords

Digital Economy, Yangtze River Economic Belt, Manufacturing, Green and Low-Carbon Transformation and Upgrading

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

长江经济带作为沿长江分布的重要经济区域和新的经济重要增长极，在空间上覆盖上海至武汉的沿江经济带、南京至杭州的东部经济走廊、南京至合肥的中部经济走廊，囊括沿线 11 个省份和全国 40% 以上的人口及 40% 以上的 GDP，工业体系完备，数据资源丰富。数字经济深度发展催生出数字化服务业，以大数据、云计算、区块链、物联网和人工智能等为其服务内容，以高度智能化、高度安全性、良好扩展性、低成本高效益和全方位支持等为其行业特征，在数字经济快速发展的背景下，数字化服务业孕育着巨大的发展空间。

数字经济正在深刻改变制造业的运作模式，成为推动其绿色低碳转型的重要力量。首先，数字技术的应用可以优化生产流程，提高资源利用效率。通过数据分析和物联网技术，企业能够实时监控生产线上的能耗情况，及时发现和优化资源浪费，从而有效降低碳排放。其次，人工智能和机器学习的引入，使得制造过程更加智能化。智能预测维修和生产调度，不仅提高了生产效率，也能减少不必要的能源消耗。此外，数字经济还促进了循环经济的发展，通过数字平台，企业可以更好地实施废弃物的回收和再利用，进一步推动绿色生产。数字化转型还为制造企业开辟了创新的路径。借助云计算和大数据分析，企业能够更加灵活地研发新产品，测试不同的材料和设计，缩短研发周期并降低成本，使产品在设计之初就能考虑到环保因素，实现从设计到生产的全面绿色化。同时，数字经济促进了供应链的透明化。通过区块链等技术，企业可以实现供应链各环节的信息共享，确保环保标准的落实，提高供应链整体的低碳水平。这种透明度增强了消费者对企业品牌的信任，也促使更多企业主动参与到低碳转型中来。数字

经济通过提升效率、促进创新、优化资源利用为制造业的绿色低碳转型提供了强大动力，具有深远的影响和重要的意义。

随着互联网的蓬勃发展，数字经济不断取得新进展。十九大提出建设数字中国，拉开全面推进数字化转型的帷幕；二十大将数字经济正式上升到国家战略水平。随着世界碳排放的加重与自然环境的恶化，中国正不断加快“双碳”目标的部署与落实。2021年“两会”上，“碳达峰、碳中和”首次出现在政府工作报告中，“双碳目标”倒逼相关产业开展低碳改革与转型，实现绿色升级。而长江经济带作为生态环境优化的先导者，制造业是长江经济带下碳排放量相对较高的产业，因此实现制造业绿色低碳转型是必要的。

2. 文献综述

利用数字技术全面促进制造业绿色发展。依据国内学者的研究来看，罗军等[1]基于中国地级及以上市域层面数据，检验数字经济驱动制造业绿色发展的空间溢出效应，研究认为，数字经济不仅驱动本地区制造业绿色发展，也通过空间溢出效应促进周边地区制造业绿色发展，空间溢出效应随着地理距离增加呈现衰退的规律。段永琴等[2]研究发现，数字金融通过促进技术密集型制造业的发展又能够有效降低实体经济能源消耗效率，成为推动我国绿色发展的新动力。周正等[3]认为地区经济发展可以有力推动当地的绿色发展，并且数字经济指数在不同时间段时，数字经济对绿色发展的作用表现出非线性影响，同时数字经济可以通过绿色技术创新、产业结构升级和资源配置效率来促进制造业绿色发展。冯亚飞[4]研究发现区块链可在中国本土培育发展成为一种新兴的内生性环境规制工具，最终实现精准治污、科学治污，实现制造业创新绿色转型。罗军[5]认为数字技术具有知识密集和清洁性的特征，数字技术与制造业的深度融合已成为驱动制造业绿色发展的重要动力。从国外学者的研究来看，国外学者主要是从制造业可持续性发展角度来开展研究。Demartini M 等[6]回顾了数字技术在可持续制造方面的应用，指出数字技术可以帮助企业提高资源利用效率、减少废弃物和能源消耗，通过数据分析、模拟和优化，数字技术可以帮助制造企业实现绿色生产流程，减少环境污染。Elena B 等[7]研究数字化对制造业可持续性的影响，结果表明，数字技术的普及与应用可以提高能源和资源利用效率，减少碳排放和废弃物生成。此外，数字技术还可以促进产品生命周期管理和供应链透明度，从而为绿色发展提供了更多机会。Igiri O 等[8]研究发现，数字化生产可以提高资源利用效率、减少废物和碳排放，而且支持产品的可回收性和再利用，通过数字化监测和分析，制造企业可以实现更有效的能源管理和环境保护。还有学者研究得出数字基础设施的普及加速了信息流动效率，通过技术创新提高了全要素生产率，通过新兴技术与数据要素的融合提高了产品的创新效率，数字化变革可以提升制造业全要素生产率且有明显的空间异质性。数字技术驱动了全球价值链分工和地位的重塑，我国要强化数字要素在数字创新驱动发展要素中的核心地位，在产业层面，强化数字经济对产业的赋能效应，打造国内大循环下的产业链与创新链共促机制[9]-[17]。基于此，本文是对长江经济带下数字经济赋能制造业绿色低碳转型升级的路径进行研究，发现二氧化碳排放与制造业发展有着紧密的联系，而数字经济作为调节变量，对制造业二氧化碳的排放有一定的影响。

3. 研究假设

3.1. 制造业与碳排放间的关系

2030年前实现二氧化碳排放达到峰值、2060年前实现碳中和——用历史上最短的时长实现从碳达峰到碳中和，这是中国向全世界许下的庄严承诺。工业领域长期以来是我国二氧化碳排放的第一大户。相关数据显示，我国二氧化碳的排放70%以上来自工业生产或生成性排放。工业，特别是制造业，降低碳排放对实现“双碳”目标至关重要。

制造业是工业的主力。相关资料显示,近年来,我国制造业增加值占GDP比重呈现下降趋势,从2010年的31.5%下降到2020年的26.2%。而以制造业闻名全球的德国和日本,这一比重大致稳定在20%左右。相比发达国家,我国工业化、城镇化等进程目前尚未结束,但比重却在下降,应引起注意。“十四五”规划和2035年远景目标纲要提出,“坚持自主可控、安全高效,推进产业基础高级化、产业链现代化,保持制造业比重基本稳定,增强制造业竞争优势,推动制造业高质量发展”。王喜莲等[18]以黄河流域9省域为研究对象,作者将黄河流域工业行业碳排放情况分为高碳、中碳、低碳行业,其中非金属制品业、煤炭开采及洗选业和汽油开采业等属于高碳行业,中碳行业包括通用设备制造业、专用设备制造业、食品制造业、交运设备制造业等,低碳行业包括饮料制造业、医药制造业金属制造业等,高碳行业碳排放占比高达96.35%,且碳排放呈现出持续增长态势。

据此,提出研究假设H1

H1: 制造业发展与碳排放量呈正相关关系。

3.2. 数字经济对制造业和碳排放的调节作用

曹建飞等[19]为探讨数字经济对城市碳排放的影响,基于2011~2020年中国283个地级以上城市的面板数据,构建综合评价指标体系测算数字经济指数,核算各城市碳排放量,采用SBM模型测算城市碳排放效率,并以产业结构高级化和合理化指数来刻画城市的产业结构升级,在此基础上进行计量分析数字经济发展能够提升碳排放效率,二者呈现出“U”型关系,数字经济发展能够降低碳排放强度和减少碳排放量,均呈现出倒“U”型关系。贾明霞[20]基于2011~2021年我国285个地级以上城市数据,实证检验数字经济对流通业碳排放的影响效应。研究结果显示,数字经济显著抑制了流通业碳排放。程慧等[21]基于2011~2020年中国省级面板数据,运用综合评价指数、自下而上法、空间自相关、空间错位模型和空间杜宾模型深入剖析数字经济与旅游业碳排放的空间格局及其空间溢出效应,在空间溢出效应上,数字经济发展对本地区旅游业碳排放具有显著抑制作用。陈慧灵等[22]基于2005~2019年我国30个省份的面板数据(不包括西藏和港澳台地区数据),利用调节效应模型和动态空间杜宾模型探究数字经济发展对工业碳排放强度影响的异质性及其溢出性2005~2019年我国30个省份数字经济指数一直在快速增长,而工业碳排放强度则在逐渐降低;各省份之间差异较大,“高度数字化的省份”和“数字化不足的省份”之间的差异越来越明显,中西部省份的工业碳排放强度一直高于东部地区。

据此,提出研究假设H2

H2: 数字经济对制造业发展和碳排放之间的关系具有负向的调节作用。

4. 变量设定及数据来源

4.1. 样本选择与数据来源

选取2013~2022年长江经济带沿线11个省份的面板数据,分析制造业对碳排放量的影响以及与数字经济发展水平的关系。有关数据来源于《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》、CSMAR数据库和各省份统计年鉴等。

对于部分缺失的数据,则利用插值法进行补充,即根据存在缺失数值的历年数据做出适当的特定函数 $f(x)$ 在区间的其他点上用这特定函数值作为函数 $f(x)$ 的近似值。假设 x_j 处为缺失值点,已知其 $n+1$ 个差值节点为 $(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, n$, a_i 代表 i 阶差商, $F(x)$ 代表牛顿差值公式。

第一步,计算差商。

$$\text{一阶差商: } a_1 = f(x_0, x_1) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0}$$

$$\text{二阶差商: } a_2 = f(x_0, x_1, x_2) = \frac{f(x_0, x_1) - f(x_1, x_2)}{x_0 - x_2}$$

$$\text{三阶差商: } a_3 = f(x_0, x_1, x_2, x_3) = \frac{f(x_0, x_1, x_2) - f(x_1, x_2, x_3)}{x_0 - x_3}$$

$$n \text{ 阶差商: } a_n = f(x_0, x_1, \dots, x_n) = \frac{f(x_0, x_1, \dots, x_{n-1}) - f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{x_0 - x_n}$$

第二步, 根据差商的定义, 可以得到牛顿差值公式。

$$F(x) = f(x_0) + f(x_0, x_1)(x - x_0) + f(x_0, x_1, x_2)(x - x_0)(x - x_1) + \dots + f(x_0, x_1, \dots, x_n)(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_n)$$

第三步, 补全缺失值。

4.2. 变量设定

4.2.1. 被解释变量: 碳排放量(CO_2)

众所周知, 制造业的发展是碳排放的主要来源之一。随着长江经济带经济的高速发展, 制造业发展迅速。绿色低碳经济的内在逻辑是在经济稳定增长的同时降低 CO_2 排放, 因此, 使用二氧化碳排放量作为绿色低碳转型升级的衡量指标。为研究数字经济是否会推动绿色低碳转型升级, 其中 CO_2 排放量的测算关键。为避免简单的一次能源划分法导致误差过大, 根据《中国能源统计年鉴》, 将最终能源消费种类分为 8 类, 包括原煤、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气, 采用 2006 年《IPCC 国家温室气体清单指南》提供的估算化石燃料燃烧的 CO_2 排放量的方法进行计算, 所有燃料的碳排放估算可根据能源的消耗量以及 CO_2 排放系数来计算, 主要能源的相关参数及 CO_2 排放系数见表 1。计算出各种化石燃料的 CO_2 排放系数之后, 与各种燃料的消费量相乘就可以计算出各种燃料的碳排放量。

Table 1. Related parameters and CO_2 emission coefficient of major energy sources

表 1. 主要能源的相关参数及 CO_2 排放系数

能源名称	平均低位发热量(KJ/Kg)	标准煤炭系数(Kgce/kg)	单位热值含碳量	碳氧化率	二氧化碳排放系数
原煤	20,934	0.7143	26.37	0.94	1.9027
焦炭	28,470	0.9714	29.5	0.93	2.8639
原油	41,868	1.4286	20.1	0.98	3.024
汽油	43,124	1.4714	18.9	0.98	2.9287
煤油	43,124	1.4714	19.6	0.98	3.0372
柴油	42,705	1.4571	20.2	0.98	3.0998
燃料油	41,816	1.4286	21.1	0.98	3.1705
天然气	38,979	1.33	15.3	0.99	2.1649

注: CO_2 排放系数 = 平均低位发热量 \times 单位热值碳含量 \times 碳氧化率 \times 44/12。

根据计算可得 2013~2022 年长江经济带沿线 11 个省份制造业的碳排放量, 见图 1。

2013~2022 年长江经济带沿线 11 个省份制造业的碳排放量此起彼伏, 有的呈现上升趋势, 有的则呈现出下降趋势, 且各省份之间存在差异。其中, 江苏制造业的碳排放量始终保持第一, 且有上升的趋势, 其次是浙江、安徽制造业。

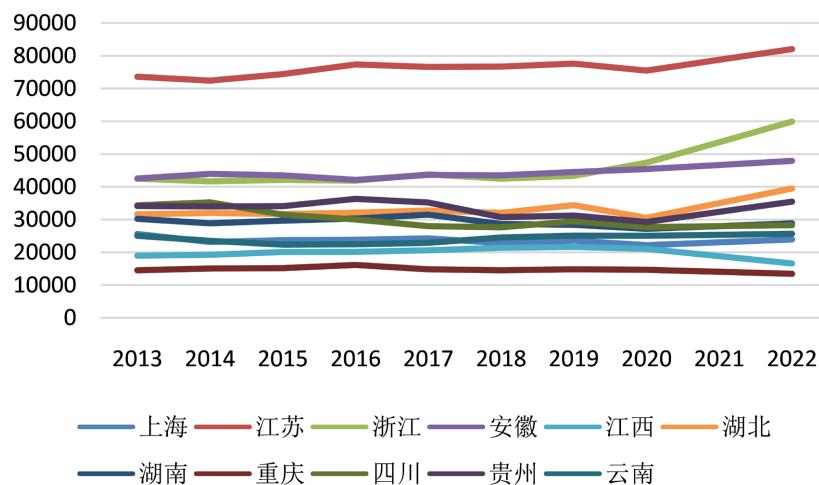


Figure 1. Manufacturing carbon emissions of 11 provinces along the Yangtze River Economic Belt from 2013 to 2022
图 1. 2013~2022 年长江经济带沿线 11 个省份制造业碳排放量

Table 2. Evaluation index system of manufacturing industry upgrading
表 2. 制造业升级评价指标体系

一级指标	二级指标	权重
研究与开发 0.41	R&D 人员折合全时当量(人年)	0.101
	R&D 经费内部支出(万元)	0.105
	技术改造经费支出(万元)	0.201
新产品开发与销售 0.35	新产品开发经费支出(万元)	0.107
	新产品销售收入(万元)	0.121
	有效发明专利数(件)	0.122
经济效益与绿色发展 0.24	规模以上工业企业资产总计(亿元)	0.077
	电力消费量(亿千瓦小时)	0.098
	废水中化学需氧量(万吨)	0.067

Table 3. Comprehensive score of manufacturing upgrading in 11 provinces and cities along the Yangtze River Economic Belt
表 3. 长江经济带 11 省市制造业升级综合得分情况

省市	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
江苏省	0.496	0.573	0.499	0.508	0.517	0.534	0.536	0.672	0.775	0.731	0.584
浙江省	0.198	0.217	0.212	0.222	0.251	0.256	0.278	0.395	0.397	0.416	0.284
四川省	0.133	0.139	0.130	0.132	0.149	0.174	0.161	0.236	0.230	0.141	0.162
上海市	0.121	0.124	0.108	0.122	0.125	0.209	0.224	0.134	0.159	0.259	0.158
湖北省	0.124	0.133	0.142	0.120	0.128	0.168	0.123	0.206	0.223	0.174	0.154
安徽省	0.084	0.090	0.087	0.092	0.111	0.132	0.111	0.188	0.198	0.134	0.123
湖南省	0.089	0.097	0.102	0.080	0.090	0.136	0.083	0.151	0.169	0.102	0.110
江西省	0.047	0.053	0.049	0.051	0.063	0.086	0.082	0.134	0.144	0.103	0.081
重庆市	0.026	0.031	0.039	0.040	0.052	0.059	0.053	0.091	0.088	0.075	0.055
云南省	0.037	0.040	0.034	0.030	0.037	0.045	0.029	0.063	0.061	0.016	0.039
贵州省	0.026	0.028	0.024	0.025	0.031	0.038	0.028	0.080	0.080	0.021	0.038

4.2.2. 核心解释变量：制造业发展水平(H)

参考前人从制造业研究和开发、新产品开发和销售、制造业经济效益和绿色发展三个维度来衡量制造业发展指标，并利用熵值法计算得到制造业升级情况综合得分，从结果来看，长江经济带产业发展比较不平衡，江浙沪、湖北、四川处于第一梯队，安徽、江西、湖南、重庆处于第二梯队，云南和贵州处于第三梯队。具体见表2、表3。

4.2.3. 调节变量：数字经济发展水平(D)

根据以往文献关于数字经济指标的归纳整理，可以得出多个衡量数字经济的具体指标。通过熵值法求得长江经济带11省市数字经济的综合得分情况见表4。统计结果来看，信息技术服务收入占比最高，其次是网页数。为了更方便地去理解，我们根据具体指标的性质将其归纳到数字基础设施、数字化能力、以及数字化收入三大维度。

Table 4. Index system of digital economy development level

表4. 数字经济发展水平指标体系

一级指标	二级指标	符号	权重
数字基础设施 0.305	互联网宽带接入用户(万户)	Z1	0.051
	互联网宽带接入端口(万个)	Z2	0.044
	移动电话普及率(部/百人)	Z3	0.034
	网页数(万个)	Z4	0.130
	域名数(万个)	Z5	0.046
数字化能力 0.345	电信业务总量(亿元)	Z8	0.120
	企业拥有网站数(个)	Z9	0.061
	信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人员(万人)	Z10	0.084
	高等教育人数(万人)	Z11	0.031
	互联网普及率	Z12	0.031
数字化收入 0.350	有电子商务交易活动企业比重%	Z13	0.018
	软件业务收入(亿元)	Z14	0.120
	信息技术服务收入(亿元)	Z15	0.141
	电子商务销售额(亿元)	Z16	0.089

根据权重得到数字经济发展水平综合得分，从结果来看，2013~2022年间，长江经济带各省市数字经济水平差异显著。以上海、江苏、浙江为核心的长江经济带数字经济发展水平领先。其结果见表5所示。

Table 5. Comprehensive score of digital economy in 11 provinces and cities along the Yangtze River Economic Belt

表5. 长江经济带11省市数字经济综合得分情况

省市	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	均值
安徽	0.054	0.074	0.105	0.118	0.132	0.177	0.223	0.245	0.194	0.206	1.528
贵州	0.004	0.015	0.031	0.044	0.059	0.089	0.130	0.150	0.118	0.131	0.772
湖北	0.077	0.102	0.141	0.152	0.161	0.196	0.250	0.267	0.227	0.252	1.825
湖南	0.054	0.071	0.094	0.117	0.124	0.158	0.213	0.245	0.181	0.190	1.446
江苏	0.304	0.364	0.411	0.452	0.487	0.581	0.646	0.702	0.624	0.683	5.255
江西	0.034	0.047	0.074	0.074	0.087	0.115	0.151	0.168	0.126	0.134	1.011

续表

上海	0.171	0.247	0.278	0.326	0.354	0.395	0.455	0.515	0.551	0.615	3.907
四川	0.096	0.144	0.196	0.217	0.249	0.304	0.370	0.433	0.355	0.377	2.741
云南	0.029	0.039	0.051	0.062	0.074	0.104	0.141	0.169	0.102	0.105	0.876
浙江	0.241	0.305	0.372	0.414	0.457	0.517	0.589	0.647	0.594	0.663	4.798
重庆	0.032	0.060	0.083	0.101	0.117	0.146	0.175	0.198	0.174	0.203	1.288

4.2.4. 控制变量

为精准评估数字经济对我国制造业绿色低碳发展的影响，并减少因缺乏变量而导致的估计误差，通过控制影响碳排放量的经济变量，从而提升模型对碳排放量的解释力。具体设置如下：① 经济发展水平(LnP_GDP)，用人均地区生产总值来表示；② 人口规模($Lnpopu$)，通过各省份年末人口规模来描绘；③ 经济发展速度(E_Grow)，用各省份每年的GDP增长速度来表示；④ 财政收入水平($Fiscal$)，以当地政府的财政收入来指代；⑤ 政策变量($Test$)，低碳省份试点政策，低碳省份试点政策是中国政府为推动绿色低碳发展而实施的一项重要政策，旨在探索低碳经济的有效模式。将试点省份作为虚拟变量加以控制，能够清晰地隔离出数字经济对制造业绿色低碳发展的影响，避免政策干预对结果的混淆。⑥ 人口密度($Dpop$)，采用各省份年末人口数与行政区域面积之比来表达。

4.3. 模型构建

基于以上的假设与理论分析，选取调节效应模型来分析数字经济发展水平对制造业发展水平作用于碳排放的调节效应，构建了以下模型：

$$CO_{2it} = \alpha + \beta_1 H_{it} + \beta_4 LnP_GDP_{it} + \beta_5 Lnpopu_{it} + \beta_6 E_Grow_{it} + \beta_7 Fiscal_{it} + \beta_8 Test_{it} + \beta_9 Dpop_{it} + \varepsilon_{it}$$

$$CO_{2it} = \alpha + \beta_1 H_{it} + \beta_2 D_{it} + \beta_3 H_{it} * D_{it} + \beta_4 LnP_GDP_{it} + \beta_5 Lnpopu_{it}$$

$$+ \beta_6 E_Grow_{it} + \beta_7 Fiscal_{it} + \beta_8 Test_{it} + \beta_9 Dpop_{it} + \varepsilon_{it}$$

上述模型分别对应假设 H1、假设 H2。其中， i 代表省份， t 代表时间， H 代表制造业发展水平， D 代表数字经济发展水平， $H*D$ 代表制造业发展与数字经济发展的交互项，用以验证数字经济发展水平对制造业发展和碳排放关系的调节效应。此外，模型还引入了部分控制变量，如 LnP_GDP 代表经济发展水平， $Lnpopu$ 代表人口规模， E_Grow 代表经济发展速度， $Fiscal$ 代表财政收入水平， $Test$ 表示政策变量， $Dpop$ 代表人口密度。 ε_{it} 为随机干扰项， β 代表变量的系数， α 代表模型的常数项。具体的变量说明见表 6。

Table 6. A description of the variables

表 6. 变量说明

变量	变量符号	具体说明
碳排放	CO_2	CO_2 总排放量
制造业发展水平	H	见核心解释变量
数字经济发展水平	D	见调节变量
经济发展水平	LnP_GDP	人均地区生产总值
人口规模	$Lnpopu$	省份年末人口规模
经济发展速度	E_Grow	GDP 增长速度
财政收入水平	$Fiscal$	当地政府的财政收入
政策变量	$Test$	低碳省份试点政策
人口密度	$Dpop$	年末人口数与行政区域面积之比

5. 实证分析

5.1. 描述性统计

通过采集长江经济带沿线 11 个省份 2013~2022 年的经济发展相关数据进行描述性统计结果见表 7。

Table 7. The correlation coefficient table

表 7. 相关系数表

变量	CO_2	H	D	$H*D$	LnP_GDP	$Lnpopu$	E_Grow	$Fiscal$	$Test$
CO_2	1.0000								
H	0.8071***	1.0000							
D	0.5974***	0.6855***	1.0000						
$H*D$	0.7434***	0.9852***	0.6689***	1.0000					
LnP_GDP	0.3372***	0.5164***	0.8511***	0.5040***	1.0000				
$Lnpopu$	0.6669***	0.4963***	0.3667***	0.4453***	-0.0526	1.0000			
E_GROW	-0.05358	-0.10772	-0.3391	-0.118	-0.3139	-0.06861	1		
$FISCAL$	0.6106***	0.6122***	0.9135***	0.5826***	0.7479***	0.3276***	-0.1808	1	
$TEST$	0.2629*	0.3830***	0.5631***	0.3518***	0.6909***	-0.11834	-0.12808	0.5855***	1
$DPOP$	-0.05915	0.043072	0.4002***	0.043576	0.7080***	-0.4377	-0.14721	0.3590***	0.4528***

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1% 的水平上显著。下同。

由表 7 可知，在不考虑其他变量影响的情况下，制造业发展水平与碳排放量的关联系数为 0.8071，在 1% 的水平上显著，表明随着制造业的不断增长，二氧化碳的排放愈加严重。数字经济发展水平与碳排放量也呈现出显著的相关性。控制变量中，经济发展水平、人口规模和财政收入水平与碳排放量显著正相关。

5.2. 回归分析

运用 Stata17 统计软件实证检验数字经济发展、制造业发展与碳排放之间的关系，根据上文模型进行回归，具体结果如表 8 所示。

Table 8. Results of regression analysis

表 8. 回归分析结果

	model1	model2
h	0.0482***	0.0153***
	9.01	6.69
d	-3.34E+04**	-8.20E+03
	-2.05	-0.52
hd		-1.62E-03***
		-4.69
$lnpopu$	2.11E+04***	1.35E+04***
	6.21	3.87
lnp_gdp	-2.50E+03	-8.30E+03**
	-0.58	-2.02

续表

<i>e_grow</i>	-2.94E+03	-9.92E+03
	-0.14	-0.5
<i>fiscal</i>	2.078494***	1.549677**
	3.1	2.5
<i>test</i>	1.76E+03	4.75E+02
	0.75	0.22
<i>dpop</i>	3.282556***	2.439327**
	2.67	2.16
<i>_cons</i>	-1.27E+05***	-1.59E+03
	-2.2	-0.03
<i>N</i>	110	110
<i>AdjR-squared</i>	0.7824	0.8199

由模型 1 可知, *h* 的系数为 0.0482, 且在 1% 的水平上显著, 说明制造业发展会增加碳排放。制造业发展带来的碳排放上升, 强调了实现绿色低碳转型的迫切性。随着经济增长, 碳排放的持续增加可能引发更加严重的环境问题(如气候变化、空气污染等), 因此, 制造业必须立即采取行动向低碳模式转型, 以避免对环境造成更大的负担。因此, 假设 H1 得以验证。

模型 2 的交互项 *hd* 系数为 -0.001621, 且在 1% 的水平上显著, 认为数字经济发展可以减少制造业发展所增加的碳排放, 使得碳排放量相应的减少。数字经济发展水平作为一个重要的调节变量, 可以有效调节制造业发展与碳排放之间的关系, 它可以通过提升生产效率、增强环保技术应用、供应链透明化等方式, 帮助制造业实现可持续发展目标, 符合全球绿色经济发展的趋势。因此, 假设 H2 得以验证。

6. 结论与建议

6.1. 结论

本文基于两个假设, 一是假设制造业发展与碳排放量呈显著正相关关系, 二是假设数字经济对制造业发展和碳排放之间的关系具有负向的调节作用, 来研究长江经济带下数字经济是否能推动制造业绿色低碳转型升级, 被解释变量用碳排放量(CO_2)来表示, 核心解释变量制造业发展水平用研究与开发、新产品开发与销售以及经济效益与绿色发展来表示, 其中研究与开发占比达到 41%, 调节变量数字经济发展水平使用数字基础设施、数字化能力、以及数字化收入来衡量, 数字化收入占比为 35%, 控制变量用经济发展水平来衡量。

基于以上构建模型, 得出结论, 证实了假设 1 和假设 2, 同时数字经济对制造业发展与碳排放之间的相关关系具有调节作用且数字经济的深度发展会抑制制造业碳排放量。

6.2. 建议

第一, 发挥数字经济对制造业绿色低碳转型的引领作用。数字经济的发展显著促进了制造业碳排放强度的下降, 是制造业绿色低碳转型的重要动力。应继续大力发展战略性新兴产业, 不仅要扩大数字经济的规模, 还要注重数字经济的发展水平, 包括积极推进数字基础设施建设、加快数字网络技术的应用、强化数字科研支撑等多方面, 充分发挥数字经济赋能制造业绿色低碳转型的资源配置效应和产品创新效应。

第二, 打造数字化和信息化的绿色制造全产业体系。积极利用物联网、大数据、云计算、区块链、人

工智能、数字孪生等新一代数字信息技术，打造网络化共享和智能化协作的绿色产业链供应链，积极推行绿色产业链供应链智慧化管理。创新数字化的绿色制造监管模式，推动碳排放源锁定、碳排放监管、碳排放预测预警等场景应用。构建数字化的绿色技术创新体系，专注于节能减排和碳捕集、碳封存等技术的网络化开发应用。完善数字化的绿色金融服务平台，实现绿色信贷和绿色企业、绿色项目的智能对接。

第三，加强数字经济赋能制造业绿色低碳转型的区域协作。数字经济赋能制造业绿色低碳转型存在显著的空间溢出效应，应通过区域协作推进制造业的绿色低碳转型。各省(区、市)在实施包括数字基础设施共建共享、数字产业发展互补互促、数字技术应用互联互通、数字技术协同研发等数字经济合作的基础上，积极建立制造业区域协同降碳机制，设立区域性制造业绿色低碳发展基金，强化节能减排技术的协同研发和推广应用，形成制造业绿色低碳发展的协同推进新格局。

参考文献

- [1] 罗军, 邱海桐. 城市数字经济驱动制造业绿色发展的空间效应[J]. 经济地理, 2022, 42(12): 13-22.
- [2] 段永琴, 何伦志, 克魁. 数字金融、技术密集型制造业与绿色发展[J]. 上海经济研究, 2021(5): 89-105.
- [3] 周正, 门博阳, 王搏. 数字经济驱动制造业高质量发展的增长效应——基于中国数字经济与制造业的实证检验[J]. 河南师范大学学报(哲学社会科学版), 2023, 50(1): 72-78.
- [4] 冯亚飞. 数字经济对制造业绿色转型的影响机制与实证研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 东北财经大学, 2020.
- [5] 罗军. 数字化如何赋能制造业绿色发展[J]. 当代财经, 2023(7): 108-120.
- [6] Demartini, M., Evans, S. and Tonelli, F. (2019) Digitalization Technologies for Industrial Sustainability. *Procedia Manufacturing*, **33**, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.032>
- [7] Bykowa, E., Volkova, J., Pirogova, O., Barykin, S.E., Kazaryan, R. and Kuhtin, P. (2022) The Impact of Digitalization on the Practice of Determining Economical Cadastral Valuation. *Frontiers in Energy Research*, **10**, Article 982976. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.982976>
- [8] Onaji, I., Tiwari, D., Soulantantork, P., Song, B. and Tiwari, A. (2022) Digital Twin in Manufacturing: Conceptual Framework and Case Studies. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **35**, 831-858. <https://doi.org/10.1080/0951192x.2022.2027014>
- [9] 王国成. 数字经济视域下的国家治理能力提升[J]. 天津社会科学, 2021(6): 100-107.
- [10] 李丽珍, 刘勇, 王晖. 以可持续供应链创新推进传统产业转型升级[J]. 宏观经济管理, 2020(11): 44-50, 56.
- [11] 张晒春, 谷洪波. 重大突发公共事件下数字经济对经济韧性的影响研究[J]. 怀化学院学报, 2022, 41(2): 51-58.
- [12] 崔和瑞, 辛媛, 赵巧芝. 区域协同治理政策的大气污染减排效应研究——基于双重差分法的实证检验[J]. 技术经济, 2022, 41(11): 94-103.
- [13] 张晋玮, 李建明. 东道国碳规制对制造业企业对外直接投资的影响研究[J]. 经济问题探索, 2021(3): 138-149.
- [14] 赵庆聪, 焦佳佳. 基于超效率 SBM 模型的公路运输碳排放效率分析[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(4): 216-222.
- [15] 张文英, 葛建华. 长江经济带数字经济环境对制造业转型升级的影响及空间异质性探析[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2023, 44(3): 51-62.
- [16] 葛立宇, 莫龙炯, 黄念兵. 数字经济发展、产业结构升级与城市碳排放[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2022, 42(10): 20-37.
- [17] 费威, 于宝鑫, 王维国. 数字经济发展与碳减排——理论推演与实证检验[J]. 经济学家, 2022(11): 74-83.
- [18] 王喜莲, 屈丽航. 黄河流域工业碳排放时空演化特征及影响因素[J]. 环境科学, 2024, 45(10): 5613-5623.
- [19] 曹建飞, 韩延玲, 刘慧龙. 数字经济发展如何影响城市碳排放?——来自中国 283 个地级市的经验数据[J]. 生态经济, 2024, 40(2): 39-51.
- [20] 贾明霞. 数字经济对流通业碳排放的影响效应[J]. 商业经济研究, 2024(2): 38-41.
- [21] 程慧, 任春悦, 游珊. 数字经济与旅游业碳排放: 空间格局及溢出效应[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2023, 17(5): 85-96.
- [22] 陈慧灵, 杨雪珂, 王振波. 数字经济对工业碳排放强度的影响及溢出效应[J]. 环境科学研究, 2024, 37(4): 672-685.