

数字经济对我国碳排放的影响研究

张争妍 李豫新¹

(石河子大学 经济与管理学院, 新疆 石河子 832003)

【摘要】: 基于 2013-2020 年的 30 个省份数据构建面板数据模型, 从碳排放总量和碳排放强度两个视角研究数字经济发展对区域碳排放的影响。研究发现: 数字经济的发展有效地降低了人均碳排放量、碳排放增量与碳排放增速, 数字经济与碳排放强度之间存在倒“U”形关系, 数字经济与碳排放强度、边际碳排放强度的关系呈现区域性特征, 在省域层面数字经济对边际碳排放强度的影响不存在明显的空间效应, 数字经济对碳排放增长率的影响存在基于产业结构优化、人口集聚、城镇化的遮掩效应。

【关键词】: 数字经济 碳排放总量 碳排放强度 倒“U”形 遮掩效应

【中图分类号】: F49; X322 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1003-7217(2022)05-0146-09

一、引言

推进碳减排是应对气候变化与环境问题的迫切需求。近年来, 我国一直致力于推进落实碳减排工作, 并于 2020 年 9 月提出“碳达峰碳中和”的战略目标, 同年 12 月, 习近平总书记进一步指出, 二氧化碳排放强度 2030 年要比 2005 年下降 65% 以上。实现碳达峰碳中和, 是破解资源环境约束、构建发展新格局、推动经济转型升级、实现高质量发展的内在要求。与此同时, 数字经济快速兴起发展, 广泛影响社会经济的各个领域, 推动生产、生活方式的变革。《“十四五”数字经济发展规划》提出, 数字经济将步入普惠共享、全面扩展阶段, 至 2035 年迈向繁荣成熟期。2022 年, 习近平总书记指出要“不断做强做优做大我国数字经济”。《2021 数字碳中和白皮书》指出, 数字技术推动重点行业向数字化、绿色化转型, 赋能碳减排, 信息通信技术加速各部门数字化道路的演进, 数字经济碳减排潜力巨大。当前, 数字经济的技术手段、成本效率优势成为推动低碳转型的重要力量, 在我国碳减排目标实施中发挥的作用不可或缺。

学术界对碳减排和数字经济给予了广泛关注, 主要集中在以下三个方面: 第一, 对数字经济指数测算及其演变^[1,2]以及数字经济对全要素生产率^[3]、经济高质量发展^[4]、创新绩效^[5]、城乡收入差距^[6]等的影响; 第二, 从城镇化^[7]、技术进步^[8]、金融发展^[9]、经济增长^[10]、国际贸易^[11]、FDI^[12]、政府行为^[13]等不同角度探讨了对碳排放的影响以及碳减排的路径; 第三, 数字经济与碳排放或碳减排之间的关系。数字经济与碳排放或碳减排之间的关系的相关研究主要分为两类: 一类是数字技术产业或数字经济对碳减排潜力进行实证测算, 发现 ICT 产业对中国二氧化碳减排具有显著贡献, 且中部地区二氧化碳减排的影响大于东部地区^[14]; 信息通信技术的发展、互联网的使用及普及率的提高在长期而言会显著降低碳排放^[15,16]; 增加信息通信技术基础设施投资对减少碳排放也有显著作用^[17]; 部分研究认为信息通信技术产业的快速发展, 导致电力消耗的快速增长, 从而推动碳排放增加^[18,19]。另一类是数字经济对碳减排的效应研究, 数字经济显著推动了低碳产业的发展^[20], 数字经济产生的基础设施效应、结构优化效应、技术创新效应以及资源配置效应显著改善了城市碳排放^[21]; 数字经济通过提升资源、能源的利用效率而产生的直接、间接效应推

作者简介: 张争妍(1987—), 女, 山东菏泽人, 石河子大学经济与管理学院博士研究生, 研究方向: 区域经济发展; 李豫新(1962—), 男, 河南唐河人, 石河子大学经济与管理学院教授, 博士生导师, 研究方向: 区域经济发展。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801119)

动产业数字化，减少碳排放^[22]。

在实现碳达峰与碳中和目标的长期路径上，数字经济赋能行业绿色低碳发展，引领我国经济实现结构转型，成为推动我国经济高质量、可持续发展的主要动力已是基本共识。焦点问题是，数字经济发展是否能够助力碳减排呢？数字经济是如何助力碳减排的，其中的作用机制如何？本文从碳排放强度和碳排放总量视角，构建面板数据模型研究省域层面数字经济对碳排放的影响，检验碳排放与数字经济之间存在线性抑或非线性关系，分析数字经济对区域碳排放强度影响的区域异质性，并检验数字经济对边际碳排放强度影响的空间效应以及数字经济对碳排放影响的中介效应，厘清数字经济发展与碳减排的内在关联，以期为实现双碳目标提供有益的政策启示。

二、理论分析与研究假设

(一) 数字经济对碳排放的影响

数字经济的碳减排效应主要体现在以下三个方面：第一，数字经济发展促进碳减排的直接效应。数字经济通过信息通信技术围绕信息、知识等生产要素产生的一系列生产消费活动，其绿色化水平普遍高于传统制造业。数字产品制造、服务、技术应用等数字化产业对环境产生的负面效应少，具有环境友好、绿色低碳的特点。第二，数字经济发展促进碳减排的间接效应。数字经济领域的人工智能、云计算等核心技术通过对传统产业的生产运行方式进行改造，对经济转型和低碳发展起到了重要的促进作用。数字化产业可利用数字技术的渗透和衍生作用带动不同行业向智能化、绿色化发展，减少基础设施生产制造阶段与运营阶段的能源消耗和碳排放。以数字化为核心的技术革命通过数字化改造来助力企业和城市管理的能效提升，通过上下游体系的改造来减少物料和能源的消耗，大幅提升工业生产、城市管理等方面的运行效率，助力能源产业的数字化转型，对于减碳的推动作用巨大的。第三，数字经济发展促进碳减排的外溢效应。在数字经济与城市发展方面，数字科技通过基础设施建设、数字化管理等方面推动智慧城市的建设，夯实碳市场建立的基础，进而助力碳减排试点工作开展。自碳排放权交易试点工作开展以来，其试点成效显著。数字经济发展有利于碳市场的建立，进而降低碳排放。假设二氧化碳排放量为 CO_2 ，在碳达峰之前碳排放量的减少可以表现碳排放增量的减少，即 $\Delta CO_{2it} (\Delta CO_{2it} = CO_{2it} - CO_{2it-1})$ 的减少，也可表现为碳排放增速的降低，即 $(CO_{2it} - CO_{2it-1}) / CO_{2it-1}$ 的降低，亦可表现为人均碳排放量的降低。

基于上述分析，提出：

假设 1 数字经济发展有利于碳排放增量的减少，碳排放增速和人均碳排放量的降低。

(二) 数字经济对碳排放强度的影响

数字经济发展通过直接效应、间接效应和外溢效应促进碳排放增量的下降。数字经济发展促进碳减排的直接效应、间接效应、外溢效应可以总称为数字经济促进碳减排的替代效应。同时数字经济的发展促进了经济总量的增加，进而会促进碳排放总量的增加，这称为数字经济促进碳减排的收入效应。数字经济对碳排放强度的影响取决于数字经济促进碳减排的替代效应、收入效应产生的碳排放量的变化以及区域经济增速。在数字经济发展初期，数字产业发展的碳减排的直接效应不明显，同时数字产业发展推动产业数字化碳减排的间接效应以及数字产业化和产业数字化所产生的碳减排外溢效应没有显现，进而使碳排放总量增速大于区域经济增速，数字经济对边际碳排放强度的影响为正。当数字经济发展超过一定规模时数字产业发展的碳减排的直接效应显现，数字产业发展推动产业数字化碳减排的间接效应以及数字产业化和产业数字化所产生的碳减排外溢效应逐步凸显，进而使碳排放总量增速小于区域经济增速，数字经济对边际碳排放强度的影响为负。假设区域碳排放强度为 $CARBE$ ，区域碳排放总量的增速为 a ，经济增速为 $b (b > 0)$ ， $CARBE_{it} = CO_{2it} / GDP_{it} = CO_{2it-1} (1+a) / GDP_{it-1} (1+b)$ 。若 $a > b$ ，则 $CARBE_{it} - CARBE_{it-1} = CO_{2it-1} (a-b) / GDP_{it-1} (1+b) > 0$ ，可得 $CARBE_{it} > CARBE_{it-1}$ 。若 $a < b$ ，则 $CARBE_{it} - CARBE_{it-1} = CO_{2it-1} (a-b) / GDP_{it-1} (1+b) < 0$ ，可得 $CARBE_{it} < CARBE_{it-1}$ 。

基于上述分析，提出：

假设 2 数字经济发展与碳排放强度之间存在倒“U”形关系。

三、模型设定、变量与数据

(一)模型设定

将二氧化碳(CO₂)排放分解如下：

$$CO_2 = P \times \frac{GDP}{P} \times \frac{CO_2}{GDP} \quad (1)$$

其中，P 为人口总量，GDP 为经济总量，并对式(1)取时间的对数可得：

$$CO_2' = P' \times \frac{GDP}{P} \times \frac{CO_2}{GDP} + P \times \left(\frac{GDP}{P}\right)' \times \frac{CO_2}{GDP} + P \times \frac{GDP}{P} \times \left(\frac{CO_2}{GDP}\right)' \quad (2)$$

进一步简化为：

$$CO_2' = P' \times \frac{CO_2}{P} + \left(\frac{GDP}{P}\right)' \times \frac{P \times CO_2}{GDP} + \left(\frac{CO_2}{GDP}\right)' \times GDP \quad (3)$$

若要实现碳达峰并下降，则必须实现 $CO_2' \leq 0$ 。在 $\frac{CO_2}{P} > 0, \frac{P \times CO_2}{GDP} > 0, GDP > 0, P' > 0,$

$\left(\frac{GDP}{P}\right)' > 0$ 的前提下，则需要达到以下条件： $\left(\frac{CO_2}{GDP}\right)' < 0$ 。令 $CARBE = \frac{CO_2}{GDP}$ ，

基于 STIRPAT 模型构建计量经济模型^[23]，以分析数字经济对碳排放的影响。

$$CARBE_x = \alpha P_x^\beta A_x^\lambda T_x^\delta \mu_x \quad (4)$$

对式(4)取对数可得：

$$\ln CARBE_x = \ln \alpha + \beta \ln P_x + \lambda \ln A_x + \delta \ln T_x + \epsilon_x \quad (5)$$

用人口规模 (POP) 和城镇化率 (URB) 两个因素度量人口数量, 用经济规模 (PGDP)、数字经济发展水平 (DE)、经济开放 (OPEN) 度量富裕程度, 用工业化 (IND) 和产业结构 (OIS) 表示技术进步, 即:

$$P_x = P(POP_x, URB_x) \quad (6)$$

$$A_x = A(DE_x, PGDP_x, OPEN_x) \quad (7)$$

$$T_{it} = T(IND_x, OIS_x) \quad (8)$$

将式 (6)、式 (7)、式 (8) 代入式 (5), 同时加入数字经济的平方项, 可得模型 1:

$$\begin{aligned} \ln CARBE_x = & a_0 + a_1 \ln DE_x + a_2 (\ln DE_x)^2 + \\ & a_3 \ln PGDP_x + a_4 \ln POP_x + a_5 \ln URB_x + \\ & a_6 \ln OPEN_x + a_7 \ln IND_x + a_8 \ln OIS_x + \varepsilon_x \end{aligned} \quad (9)$$

为进一步检验数字经济对碳排放的影响, 分析研究数字经济对人均碳排放量 (CO₂P)、碳排放增量 (CO₂I)、碳排放增速 (IRCO₂)、边际碳排放强度 (MCARBE=ΔCO₂/ΔGDP) 的影响, 构建模型 2、3、4、5:

$$\begin{aligned} \ln CO_2 P_x = & b_0 + b_1 \ln DE_x + b_2 \ln PGDP_x + \\ & b_3 \ln URB_x + b_4 \ln OPEN_x + b_5 \ln IND_x + \\ & b_6 \ln OIS_x + \varepsilon_x \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} CO_2 I_x = & c_0 + c_1 \ln DE_x + c_2 \ln PGDP_x + \\ & c_3 \ln POP_x + c_4 \ln URB_x + c_5 \ln OPEN_x + \\ & c_6 \ln IND_x + c_7 \ln OIS_x + \varepsilon_x \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} IRCO_{2x} = & d_0 + d_1 \ln DE_x + d_2 \ln PGDP_x + \\ & d_3 \ln POP_x + d_4 \ln URB_x + d_5 \ln OPEN_x + \\ & d_6 \ln IND_x + d_7 \ln OIS_x + \varepsilon_x \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} MCARBE_{2x} = & e_0 + e_1 \ln DE_x + e_2 \ln PGDP_x + \\ & e_3 \ln POP_x + e_4 \ln URB_x + e_5 \ln OPEN_x + \\ & e_6 \ln IND_x + e_7 \ln OIS_x + \varepsilon_x \end{aligned} \quad (13)$$

(二) 变量说明

1. 被解释变量。

碳排放强度 (CARBE) 用二氧化碳排放量与区域生产总值的比值衡量, 即 $CARBE_{it} = CO_{2it} / GDP_{it}$; 人均碳排放量 (CO₂P) 用二氧化碳排放量与人口规模比值表征, 即 $CO_2 P_{it} = CO_{2it} / POP_{it}$; 碳排放增量 (CO₂I) 用当年与上一年二氧化碳排放量之差表征, 即 $CO_2 I_{it} = CO_{2it} - CO_{2it-1}$

i ;碳排放增速(IRC_{CO₂})用每年二氧化碳增速表征,即 $IRC_{CO_2it} = (CO_{2it} - CO_{2it-1}) / CO_{2it-1}$;边际碳排放强度用碳排放增量与国内生产总值增量的比值表征,即 $MCARBE_{it} = (CO_{2it} - CO_{2it-1}) / (GDP_{it} - GDP_{it-1})$ 。本文利用煤炭、焦炭、原油、汽油、煤油、柴油、燃料油、天然气八种能源消费量计算二氧化碳排放量¹。

2. 解释变量。

结合我国省域数字经济发展的实际,立足于数字基础设施建设(DEDI)、数字产业化(DI)以及产业数字化(ID)三个维度,坚持客观性、全面性、科学性以及有效性等原则选取相应的细分指标,并结合许宪春和张美慧^[1]、王军等^[2]关于互联网和数字经济的研究,构建数字经济发展水平指标体系,并在该指标体系的基础上测算我国省际层面的数字经济发展水平指数。我国省域数字经济发展水平测度指标体系如表1所示。

表1 我国省域数字经济评价指标体系

一级指标	二级指标	权重
数字基础设施建设	互联网宽带接入接口	0.0862
	互联网宽带接入用户	0.1010
	每万人拥有网页数	0.0505
	每万人拥有互联网域名数	0.0530
数字产业化	电信业务总量	0.0493
	软件产品收入	0.0780
	信息传输、软件和信息技术服务业行业城镇单位就业	0.0721
	信息技术服务收入	0.0613
	互联网百强企业数	0.0640
产业数字化	电子商务采购额	0.0661
	电子商务销售额	0.0798
	快递量	0.1010
	数字普惠金融指数	0.0794
	电子商务交易活动企业比重	0.0583

3. 控制变量。

参照相关研究^[7,21],选取经济规模、经济开放、工业化、产业结构、人口规模、城镇化率等6个方面的控制变量。其中经济规模(PGDP)用人均地区生产总值表示;经济开放(OPEN)用进出口总额与地区生产总值的比值表示;工业化(IND)用工业增加值与地区生产总值的比值表示;产业结构(OIS)用第三产业增加值与第二产业增加值的比值表示;人口规模(POP)用年末常住人口表示;

城镇化率(URB)用城镇人口与年末常住人口的比值表示。

(三)数据来源

本文采用 2013-2020 年我国 30 个省(自治区、直辖市)的面板数据作为研究样本(由于数据的可得性,西藏、香港、澳门及台湾地区予以剔除)。样本数据主要来源于国家统计局官网以及历年《中国统计年鉴》《中国信息年鉴》《中国信息产业年鉴》《北京大学数字普惠金融指数》。各变量描述性统计如表 2 所示。

表 2 变量描述性统计

变量	均值	标准差	最小值	最大值	N
CARBE	92.3674	91.3039	8.7394	527.6889	240
CO ₂ I	12.7995	21.5091	-62.0721	140.2401	240
IRCO ₂	0.0973	0.1264	-0.3292	0.6813	240
MCARBE	0.0065	0.8594	-12.2254	1.6701	240
DE	1.1897	0.1409	1.0025	1.7620	240
DI	0.3595	0.0465	0.3248	0.5919	240
ID	0.4832	0.0601	0.3868	0.7244	240
DEDF	0.3470	0.0431	0.2908	0.4885	240
PGDP	57881.5700	28432.2400	22825.0000	164889.0000	240
POP	4625.7420	2867.6000	571.0000	12624.0000	240
OPEN	25907.8300	26258.3500	763.6719	125711.3000	240
IND	0.3244	0.0748	0.0969	0.5100	240
OIS	1.3971	0.7453	0.6653	5.2968	240
URB	0.5955	0.1175	0.3648	0.9415	240

四、实证结果与分析

(一)数字经济与碳排放的关系——线性抑或非线性

采用广义矩估计(GMM)方法对模型 1~4 进行回归分析,这样有助于克服数字经济内生性问题。由于差分 GMM 估计(差分广义矩估计)的弱工具变量与小样本偏误的问题,因此本文运用系统 GMM 对模型 1~4 进行估计。表 3 中列出了系统 GMM 的估计结果。由此可知,Sargan 检验结果表明各模型不存在工具变量过度识别的问题,工具变量是有效的,而 Arelleno-Bond 检验表明各模型残差之间存在一阶自相关关系,不存在二阶自相关关系。因此,系统 GMM 估计量是一致且有效的。

由表 3 的实证结果可知, 数字经济的平方项 ($\ln DE^2$) 对碳排放强度 ($\ln CARBE$) 的影响系数显著为负, 这说明数字经济与碳排放强度之间存在倒“U”形关系, 即数字经济发展初期会提高碳排放强度, 但当数字经济达到一定规模时其发展可以有效地降低碳排放强度。由表 3 的实证结果亦可知, 数字经济 ($\ln DE$) 对人均碳排放量 ($\ln CO_2P$)、碳排放增量 (CO_2I)、碳排放增速 ($IRCO_2$) 的影响系数均显著为负, 这说明数字经济可以有效地降低人均碳排放量、碳排放增量与碳排放增速, 即从碳排放增量视角看数字经济发展可以通过降低碳排放总量和碳排放增速来实现降低碳排放总量的目的, 数字经济发展可以有效地促进碳减排。2021 年中央经济工作会议指出, 要“创造条件尽早实现能耗‘双控’向碳排放总量和强度‘双控’转变”。实证分析可知, 无论从人均碳排放量 ($\ln CO_2P$) 视角, 还是碳排放增量 (CO_2I) 视角, 抑或碳排放增速 ($IRCO_2$) 视角, 数字经济的发展有利于 2030 年实现碳达峰的目标, 亦有利于 2060 年实现碳中和的目标。数字经济对碳排放强度的影响具有一定的规模门槛, 当数字经济超过规模门槛时, 其发展会有利于碳排放强度的降低。这可能是由于数字经济发展初期, 数字产业发展的碳减排的直接效应不明显, 甚至可能会推动碳排放的增加, 同时数字产业发展推动产业数字化碳减排的间接效应以及数字产业化和产业数字化所产生的碳减排外溢效应没有显现, 进而使碳排放总量增速大于区域经济增速², 也可以解释为数字经济未超过规模门槛时, 其对边际碳排放强度的影响为正。

表 3 数字经济与碳排放关系的系统 GMM 回归

解释变量	被解释变量			
	$\ln CARBE$	$\ln CO_2P$	CO_2I	$IRCO_2$
$\ln DE$	2.1325	-0.6543**	-169.3458**	-0.5657**
	(1.3023)	(0.3328)	(86.1861)	(0.2643)
$\ln DE^2$	-2.2592*			
	(1.1735)			
控制变量	YES	YES	YES	YES
被解释变量滞后阶数	2	1	1	1
_CONS	5.3067**	-0.2075	-458.8660	1.9913
	(2.4906)	(1.5001)	(314.2953)	(2.0234)
N	180	180	180	180
AR (1)	-2.2175	-2.5460	-1.8271	-1.8433
	(0.0266)	(0.0109)	(0.0677)	(0.0653)
AR (2)	-0.8251	0.2013	0.5097	0.6489
	(0.4093)	(0.8404)	(0.6103)	(0.5164)
chi2	63.1792	44.2015	22.5654	20.3482
	(0.1597)	(0.1638)	(0.4266)	(0.8158)

注: **、*、*分别表示在 1%、5%和 10%的置信水平上显著, 下同; 在所有的回归模型中, 数字经济以及其平方项被认为是内

生变量，以其一阶滞后项和高阶滞后项作为水平方程中数字经济及其平方项的工具变量；括号内为稳健性标准误，下同。

(二)数字经济对碳排放强度影响的区域异质性

为检验数字经济对碳排放强度影响的异质性，分别分析数字经济对东部、中部、西部地区的碳排放强度的影响³，以及对北方、南方地区碳排放强度的影响⁴。由表4的实证结果可知，不论是按照东部、中部、西部划分，还是按照北方、南方划分，数字经济对区域碳排放强度的影响均呈现倒“U”形特征，其中东部地区、北方地区数字经济的平方项(lnDE²)对区域碳排放强度影响的系数显著为负，说明东部地区、北方地区数字经济对区域碳排放强度影响的倒“U”形特征明显。这进一步表明不论是从东部、中部、西部地区视角，抑或是从北方、南方地区视角来看，数字经济对碳排放强度的影响具有一定的规模门槛。当数字经济超过规模门槛时，其发展会有效地降低区域碳排放强度，这更加说明了“不断做强做优做大我国数字经济”的重要性与紧迫性，因为只有当数字经济达到一定规模才有助于区域碳排放强度的下降。

表4 数字经济对不同区域碳排放强度的影响

解释变量	被解释变量 lnCARBE				
	东部地区	中部地区	西部地区	北方地区	南方地区
lnDE	9.0426**	3.0901	11.6281	9.9262**	1.5447
	(3.4285)	(3.9808)	(10.2058)	(3.4466)	(3.5247)
lnDE ²	-6.5025*	-7.8649	-21.1462	-6.7737*	-1.0432
	(3.1042)	(6.8653)	(14.8031)	(3.5490)	(4.4237)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
_CONS	46.3151**	-6.6443	12.9713	34.7451***	20.8769
	(18.0075)	(7.1898)	(16.5253)	(11.6062)	(21.0004)
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES
时点效应	YES	YES	YES	YES	YES
N	88	64	88	120	120
adj. R-sq	0.4623	0.5583	0.4099	0.3575	0.3043

为进一步分析数字经济发展对碳排放强度的影响，本文分区域回归分析模型5。由表5的实证结果可知，数字经济对东部地区、北方地区和南方地区的边际碳排放强度的影响系数为负，数字经济对中部地区和西部地区的边际碳排放强度的影响系数为正，其中数字经济对东部地区、南方地区的边际碳排放强度的影响系数显著。这说明数字经济的发展有效地降低了东部地区和南方地区边际碳排放强度，这在一定程度上表明数字经济的发展可以有效降低东部地区和南方地区的碳排放强度。同时也表明相对于东部地区，中部地区、西部地区以及相对于南方地区的北方地区应努力做大数字经济规模，尽快显现数字经济对碳排放强度的抑制效应。

表 5 数字经济对不同区域边际碳排放强度的影响

解释变量	被解释变量 MCARBE				
	东部地区	中部地区	西部地区	北方地区	南方地区
lnDE	-4.0235*	5.7576	2.7624	-6.1467	-0.4747*
	(2.3762)	(5.0672)	(17.2235)	(7.6767)	(0.2833)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES
_CONS	-17.5606	46.92	-15.9440	-3.2087	0.6099
	(32.6611)	(36.7172)	(122.6522)	(60.7918)	(5.1302)
个体效应	YES	YES	YES	YES	YES
时点效应	YES	YES	YES	YES	YES
N	88	64	88	120	120
adj. R-sq	0.2759	0.3003	0.1142	0.1275	0.1785

碳排放强度 (CARBE)、边际碳排放强度 (MCARBE) 与数字经济 (DE) 的关系如图 1 所示。2030 年 CARBE 目标线为碳排放强度比

2005 年下降 65% 以上，碳达峰 MCARBE 目标线为 $MCARBE = -\frac{1}{GDP} \left(P \times \frac{CO_2}{P} + \left(\frac{GDP}{P} \right)' \times \frac{P \times CO_2}{GDP} \right)^5$ 。东部地区未有省份数字经济超过该区域数字经济规模门槛，所有省份碳排放强度与数字经济的关系处于由阶段 II；中部地区安徽、江西、河南、湖南、湖北等 5 个省份数字经济超过该区域数字经济规模门槛，碳排放强度与数字经济的关系处于由阶段 II 向阶段 III 过渡的阶段，山西、吉林、黑龙江等 3 个省份碳排放强度与数字经济的关系处于阶段 II；西部地区四川数字经济超过该区域数字经济规模门槛，碳排放强度与数字经济的关系处于由阶段 II 向阶段 III 过渡的阶段，而重庆、云南、贵州、陕西、广西、内蒙古、甘肃、宁夏、青海、新疆等 10 个省份碳排放强度与数字经济的关系处于阶段 I。

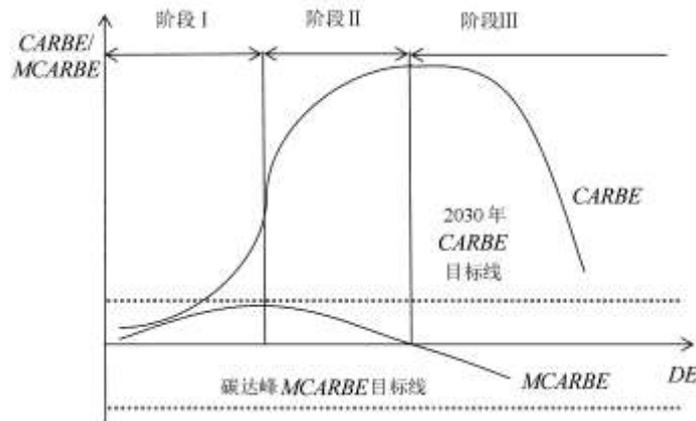


图 1 碳排放强度 (CARBE)、边际碳排放强度 (MCARBE) 与数字经济 (DE) 关系图

表 6 不同省份碳排放强度与数字经济关系所处阶段

区域	东部地区	中部地区	西部地区
数字经济超过倒“U”形拐点省份	无	安徽、江西、河南、湖南、湖北	四川
所处阶段		阶段 II 向阶段 III 过渡	阶段 II 向阶段 III 过渡
数字经济未超过倒“U”形拐点省份	北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东、海南	山西、吉林、黑龙江	重庆、贵州、云南、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、内蒙古
所处阶段	阶段 II	阶段 II	阶段 I

(三) 数字经济对边际碳排放强度影响的空间效应检验

运用空间杜宾模型 (SDM) 检验数字经济不同维度 [数字产业化 (lnDI)、产业数字化 (lnID) 和数字基础设施建设 (lnDED)] 对边际碳排放强度的影响是否存在空间效应。表 7 的实证结果表明, 采用邻接权重矩阵、经济距离权重矩阵、地理距离权重矩阵等不同权重矩阵的情形下, 都未发现数字产业化 (lnDI)、产业数字化 (lnID) 和数字基础设施建设 (lnDED) 对邻近区域边际碳排放强度有显著的影响, 同时相对于产业数字化和数字基础设施建设, 数字产业化可以有效地降低本区域边际碳排放强度。在省域层面数字经济对边际碳排放强度的影响不存在明显的空间效应, 这可能是因为在城市层面上数字经济的发展对不同城市碳排放的影响在不同经济圈层内存在差异, 数字经济对碳排放的空间外溢具有边界效应。

表 7 数字经济不同维度对边际碳排放强度的 SDM 模型回归

权重选择	lnDI	W × lnDI	lnID	W × lnID	lnDED	W × lnDED
邻接权重	-3.1947*	-1.3062	-0.7334	10.3368	-0.9208	-0.9183
	(1.9331)	(3.1242)	(1.6948)	(10.8838)	(1.5115)	(2.8223)
rho	-0.2058***		-0.1908**		-0.2058***	
经济距离权重	-3.3380*	-5.5591	-0.6978	17.4423	0.0906	5.7279
	(1.7367)	(6.5118)	(2.2207)	(16.6187)	(1.1162)	(5.4923)
rho	-0.3181***		-0.3329***		-0.3144***	
地理距离权重	-4.3171*	5.7588	-4.6781	-5.8937	-1.6243	3.1860
	(2.2904)	(6.9515)	(3.3931)	(7.4701)	(1.9287)	(3.9381)
rho	-0.3938***		-0.4133***		-0.4065***	
控制变量	YES		YES		YES	

时点效应	YES	YES	YES
固定效应	YES	YES	YES
N	240	240	240

(四) 数字经济对碳排放影响的中介效应检验——中介抑或遮掩

为探究数字经济对碳排放影响的作用机理，对数字经济对碳排放增长率(IRC₂)的影响是否存在中介效应进行检验。表 8 的实证结果表明数字经济对碳排放增长率的影响存在基于产业结构优化(lnOIS)、人口集聚(lnPOP)、城镇化(lnURB)的遮掩效应。产业结构优化的遮掩效应是数字经济促进了产业结构的优化，产业结构的优化增大了碳排放增速，数字经济抑制了碳排放增速的上升。人口集聚的遮掩效应是数字经济促进了人口集聚，人口集聚增大了碳排放增速，数字经济抑制了碳排放增速的上升。城镇化的遮掩效应是数字经济抑制了城镇化，城镇化降低了碳排放增速，数字经济抑制了碳排放增速的上升。值得注意的问题是通过检验对数字经济对碳减排作用机理的检验发现，虽然数字经济推动了区域产业结构升级，但产业结构升级未有效降低反而提高了碳排放增速；数字经济促进了人口集聚，但人口的集聚会使增高区域碳排放增速；城镇化抑制了碳排放增速的增加，但数字经济的发展抑制了城镇化。因此，在推进数字经济健康发展的进程中要强化数字经济对低碳产业发展的驱动效应，协调推进城乡数字经济的发展，注意数字鸿沟问题导致的“逆城镇化”。

表 8 数字经济对碳排放增长率的中介效应回归

	IRC ₂	lnOIS	IRC ₂	IRC ₂	lnPOP	IRC ₂	IRC ₂	lnURB	IRC ₂
lnDE	-0.2048	0.7433***	-0.3633**	-0.06661	6.4656***	-0.3633**	-0.2746	-0.3588***	-0.3633**
	(0.1767)	(0.1470)	(0.1836)	(0.1268)	(0.3981)	(0.1836)	(0.1827)	(0.1257)	(0.1836)
lnOIS			0.2133***						
			(0.0777)						
lnPOP						0.0459**			
						(0.0207)			
lnURB									-0.2472***
									(0.0941)
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数项	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
N	240	240	240	240	240	240	240	240	240
adj. R-sq	0.0660	0.9221	0.0954	0.0762	0.7350	0.0954	0.0685	0.7990	0.0954
Sobel(z 值)	0.1585** (2.413)			0.2967** (2.197)			0.0887* (1.934)		

五、结论与建议

通过以上研究得出如下结论：(1)数字经济的发展有效地降低了人均碳排放量、碳排放增量与碳排放增速，有利于2030年实现碳达峰的目标。(2)数字经济与碳排放强度之间存在倒“U”形关系，当数字经济超过区域数字经济规模门槛时，其发展会有利于碳排放强度的降低。数字经济对东部地区、北方地区区域碳排放强度的影响存在明显的倒“U”形特征。(3)通过数字经济对碳排放影响的区域异质性分析，发现各省份碳排放强度与数字经济的关系处于阶段I、阶段II抑或处于由阶段II向阶段III过渡的阶段，未有省份碳排放强度与数字经济的关系处于阶段III。(4)在省域层面，数字经济对边际碳排放强度的影响不存在明显的空间效应，相对于产业数字化和数字基础设施建设，数字产业化有效地降低了本区域边际碳排放强度。(5)数字经济对碳排放增长率的影响存在基于产业结构优化、人口集聚、城镇化的遮掩效应。

基于此，提出以下建议：(1)不断做强、做大数字经济，因为不论从人均碳排放量，还是碳排放增量，抑或碳排放增速视角来看，数字经济有效地推进了碳减排；同时数字经济对碳排放强度的影响呈现倒“U”形特征，数字经济规模突破拐点有助于进一步强化数字经济的碳减排效应。(2)加快新型基础设施建设，推动实体经济和数字技术深度融合，赋能传统产业转型升级。在将数字技术融入传统生产、提高生产效率的同时，还应注重绿色低碳技术的研发与运用，要充分发挥低碳产业的带动作用，进而推动产业整体向智能化、低碳化转型，为实现双碳目标提供可行路径。同时将推动数字经济发展融入农村基础设施建设当中，形成智慧农村建设的升级换代，厚植乡村“数字土壤”。(3)立足区域发展差异，实施异质性治理策略，不能为数字化而数字化。基于不同区域的禀赋差异以及数字经济对碳排放的影响差异，调整各地区数字经济发展步伐，破除新模式、新业态的行业壁垒和地域限制，提升各区域数字经济治理的异质性及协同性。

参考文献：

- [1]许宪春，张美慧.中国数字经济规模测算研究——基于国际比较的视角[J].中国工业经济，2020(5):23-41.
- [2]王军，朱杰，罗茜.中国数字经济发展水平及演变测度[J].数量经济技术经济研究，2021,38(7):26-42.
- [3]周晓辉，刘莹莹，彭留英.数字经济发展与绿色全要素生产率提高[J].上海经济研究，2021(12):51-63.
- [4]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.
- [5]安孟，张诚.数字经济发展能否提升中国区域创新效率[J].西南民族大学学报(人文社会科学版),2021,42(12):99-108.
- [6]陈文，吴赢.数字经济发展、数字鸿沟与城乡居民收入差距[J].南方经济，2021(11):1-17.
- [7]王星.中国城镇化对碳排放的影响——基于省级面板数据的分析[J].城市问题，2016(7):23-29.
- [8]马海良，张格琳.偏向性技术进步对碳排放效率的影响研究——以长江经济带为例[J].软科学，2021,35(10):100-106.
- [9]邓荣荣，张翱翔.中国城市数字金融发展对碳排放绩效的影响及机理[J].资源科学，2021,43(11):2316-2330.
- [10]朱欢，郑洁，赵秋运，等.经济增长、能源结构转型与二氧化碳排放——基于面板数据的经验分析[J].经济与管理研究，2020,41(11):19-34.

-
- [11]韩晶, 姜如玥, 孙雅雯. 数字服务贸易与碳排放——基于 50 个国家的实证研究[J]. 国际商务(对外经济贸易大学学报), 2021(6):34-49.
- [12]江心英, 赵爽. 双重环境规制视角下 FDI 是否抑制了碳排放——基于动态系统 GMM 估计和门槛模型的实证研究[J]. 国际贸易问题, 2019(3):115-130.
- [13]梅晓红, 葛扬, 康丽. 城市政府行政效率对碳排放的影响——基于高铁和 NGO 的调节作用[J]. 软科学, 2021, 35(12):36-41.
- [14]Zhang C, Liu C. The impact of ICT industry on CO₂ emissions: A regional analysis in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44:12-19.
- [15]Haseeb A, Xia E, Saud S, et al. Does information and communication technologies improve environmental quality in the era of globalization? An empirical analysis[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(9): 8594-8608.
- [16]Shobande O A. Decomposing the persistent and transitory effect of information and communication technology on environmental impacts assessment in Africa: Evidence from Mundlak Specification[J]. Sustainability, 2021, 13(9): 46-83.
- [17]Bhujabal P, Sethi N, Padhan P C. ICT, foreign direct investment and environmental pollution in major Asia Pacific countries[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 5:1-12.
- [18]Hamdi H, Sbia R, Shahbaz M. The nexus between electricity consumption and economic growth in Bahrain[J]. Economic Modelling, 2014, 38(2):227-237.
- [19]Salahuddin M, Alam K. Internet usage, electricity consumption and economic growth in Australia: A time series evidence[J]. Telematics and Informatics, 2015, 32(4):862-878.
- [20]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(1):1-16.
- [21]徐维祥, 周建平, 刘程军. 数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应[J]. 地理研究, 2022, 41(1):111-129.
- [22]邬彩霞, 高媛. 数字经济驱动低碳产业发展的机制与效应研究[J]. 贵州社会科学, 2020(11):155-161.
- [23]York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3):351-365.

注释:

1 煤炭的二氧化碳排放系数为 1.9003 kgCO₂/kg, 焦炭的二氧化碳排放系数为 2.8604 kgCO₂/kg, 原油的二氧化碳排放系数为 3.0202 kgCO₂/kg, 汽油的二氧化碳排放系数为 2.9251 kgCO₂/kg, 煤油的二氧化碳排放系数为 3.0179 kgCO₂/kg, 柴油的二氧化碳排放系数为 3.0959 kgCO₂/kg, 燃料油的二氧化碳排放系数为 3.1705 kgCO₂/kg, 天然气的二氧化碳排放系数为 2.1622 kgCO₂/m³.

2 假设区域碳排放总量的增速为 a , 经济增速为 $b (b > 0)$, $CARBE_{it} = CO_{2it} / GDP_{it} = CO_{2it-1}(1+a) / GDP_{it-1}(1+b)$ 。若 $CARBE_{it} > CARBE_{it-1}$, 则 $CARBE_{it} - CARBE_{it-1} = CO_{2it-1}(a-b) / GDP_{it-1}(1+b) > 0$, 可得 $a > b$ 。

3 东部地区包括北京、天津、河北、辽宁、上海、江苏、浙江、福建、山东、广东和海南等 11 个省(市); 中部地区包括山西、吉林、黑龙江、安徽、江西、河南、湖北、湖南等 8 个省; 西部地区包括四川、重庆、贵州、云南、西藏、陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆、广西、内蒙古等 12 个省(市)。

4 北方地区包括北京、天津、河北、山东、河南、山西、内蒙古、辽宁、吉林、黑龙江、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆等 15 个省市; 南方地区包括上海、江苏、浙江、安徽、江西、福建、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、四川、贵州、云南、西藏等 16 个省市。

5 由公式 (3) 可推导得出。碳达峰时, $CO_2' = 0$, 令 $CO_2 = P' \times \frac{CO_2}{P} + (\frac{GDP}{P}) \times \frac{P \times CO_2}{GDP} + (\frac{CO_2}{GDP}) \times GDP = 0$, 可得

$$MCARBE = \frac{1}{GDP} \left(P' \times \frac{CO_2}{P} + \left(\frac{GDP}{P} \right)' \times \frac{P \times CO_2}{GDP} \right).$$