·经济学研究·

DOI:10. 20004/j. cnki. ujn. 2023. 05. 008

数字经济赋能低碳发展的机理分析与实证检验

胡留所[1],胡 健[1,2],卢山冰[1]

(1.西北大学 经济管理学院,陕西 西安 710127;2.西安财经大学 中国(西安)丝绸之路研究院,陕西 西安 710100)

[摘 要]数字经济的发展给我国经济发展注入了新活力,也给"双碳"目标的实现提供新动能。研究结合数字经济发展对经典环境库兹涅茨假说进行修正,并运用2003—2020年间的281个城市的数据进行检验,结果表明:(1)中国城市的二氧化碳排放和人均GDP整体上符合环境库兹涅茨曲线假说,呈现"倒U型"。(2)数字经济在促进经济发展水平提高的同时,还会在一定程度上造成二氧化碳排放量的增加,并从整体上促进碳排放库兹涅茨曲线顶点向原点移动,对于实现绿色低碳发展具有积极影响。(3)二氧化碳排放和人均GDP的关系以及数字经济的作用,在不同区域和产业结构背景下具有异质性。研究为数字经济促进区域和产业低碳发展提供了理论基础和事实依据,也为新常态下的城市低碳转型给予了理论指引和政策建议。

[关键词]数字经济;库兹涅茨曲线;碳排放;经济增长

[中图分类号]F062 [文献标识码]A [文章编号]1671-3842(2023)05-0069-12

一、引言

数字经济作为中国经济高质量发展的重要动力,在刺激消费、拉动投资、创造就业、推动产业转型升级、培育新兴经济增长点等领域发挥着重要作用①。面对经济增速放缓和绿色低碳转型的双重压力,数字经济被寄予厚望。国务院《2030碳达峰行动方案》中就提出,要推动城市数字化建设与绿色化的协同发展,促进高耗能产业的节能减排工作,推广绿色环保低碳的生活方式,将数字经济作为实现"双碳"目标的重要途径。但另一方面,发展数字经济也会显著地增加城市电力消耗和二氧化碳排放②,给经济发展和生态文明建设带来新的压力。那么,数字经济的发展是否有利于促进中国碳排放库兹涅茨曲线拐点的提前到来?不同区域和产业结构上的表现又有何区别?结合经典理论分析数字经济影响碳排放和经济发展间的机理,从中国的发展中寻找事实证据,对于

[基金项目]本文系国家社会科学基金一般项目"价值链双重嵌入框架下中国—中亚—西亚能源经济圈的构建与协同机制研究"(项目编号:20BJL068);中国(西安)丝绸之路项目"'一带一路'倡议的关注度与政策执行评价研究"(项目编号:2016SDZ03);陕西省教育厅项目"金融创新支持能源产业高质量发展"(项目编号:20JK0265)之阶段性研究成果。

[作者简介]胡留所,西北大学经济管理学院博士研究生;胡健,西安财经大学教授、西北大学博士生导师;卢山冰,西北大学经济管理学院教授、博士生导师。

①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》,《管理世界》,2020年第10期。

②高维龙,彭影,胡续楠:《"双碳"目标下数字经济对城市节能减排的影响研究》,《城市问题》,2023年第3期。

平衡“双碳”目标和经济发展之间的关系具有重要理论和现实意义。

数字经济会对经济发展在以下三个层面产生影响:(1)微观层面。数字经济起源于互联网企业,以电商、社交为代表的数字产业形成了具有中国特色的规模经济、范围经济,很好地克服了长尾端客户需求不匹配难题,对于形成更加合理的价格机制,实现资源配置的优化,提高经济的均衡和福利水平方面起到了重要作用。随着数字技术的应用和推广,企业也在数字化转型的过程中提高了创新水平①,并且通过管理、投资、营运和劳动赋能企业,帮助企业降低运营成本,提高了企业全要素生产率,促进了企业的高质量发展②。(2)宏观层面。随着数字经济的发展,数字生产要素从知识和信息中派生出来,与劳动、资本等要素相结合,参与到社会扩大再生产的各种环节中,驱动了经济发展质量的提升。在丰富要素市场的同时,数字经济降低了信息不对称,通过数字平台和应用提供高效、便捷的信息传递和获取途径,提高了市场透明度和效率,也在不同程度提升了各个区域的生产效率③,最终推动了生产要素优化配置④,实现了宏观层面的高质量发展⑤。(3)也有研究从中观产业层面展开。数字经济不但促进了传统产业的升级⑥,推动农业、体育旅游等产业向数字化、智能化转型,而且也催生新兴产业的发展。此外,数字经济还有利于产业链上下游之间联动和沟通,对于产业结构调整,产业链和供应链安全、稳定和高效的运行具有重要意义。

数字经济与二氧化碳排放作为研究热点,多基于区域和产业层面展开讨论。(1)从区域层面来看,数字经济对碳排放的影响具有显著异质性。在数字化水平较高地区、东部经济发达地区、资金及技术禀赋较好地区,数字化能更显著的抑制能源强度和碳排放强度,从而发挥更好的节能减排效用⑦。(2)从产业层面来看,研究多集中于耗能较高的工业、制造业。研究表明,数字化会通过提升工业、制造业的劳动效率,降低其能源强度,从而过提升高耗能行业的碳排放效率,最终实现节能减排⑧。

有关二氧化碳排放与经济发展间的研究多是基于经典的环境库兹涅茨曲线假说展开。Grossman和Krueger的研究发现环境质量随着收入水平的积累先恶化后改善,呈“倒U型”关系⑨,这种关系被称为环境库兹涅茨曲线假说。随后,国内外学者利用该假说对碳排放和经济增长的关系进行了有限的理论基础构建和丰富的实证检验。从理论基础构建方面看,主要有四种,分别为“增长源

①戴艳娟,沈伟鹏,谭伟杰:《大数据发展对企业数字技术创新的影响研究——基于国家大数据综合试验区的准自然实验》,《西部论坛》,2023年第2期。

②黄勃,李海彤,刘俊岐,雷敬华:《数字技术创新与中国企业高质量发展——来自企业数字专利的证据》,《经济研究》,2023年第3期;杨蕙馨,孙芹:《数字技术与服务化对制造业企业绩效的影响研究》,《经济与管理评论》,2023年第3期;王璐,李晨阳:《数字经济下的生产社会化与企业分工协作:演进与特性》,《北京行政学院学报》,2022年第1期。

③李三希,李嘉琦,刘小鲁:《数据要素市场高质量发展的内涵特征与推进路径》,《改革》,2023年第5期。

④钟世川,毛艳华:《数字技术驱动生产率提升的效应识别及特征研究》,《科学学研究》,2023年第4期。

⑤钞小静,刘亚颖:《新型数字基础设施建设与中国经济高质量发展——基于“条件—过程—结果”协同联动的视角》,《贵州财经大学学报》,2023年第4期。

⑥丁守海,徐政:《新格局下数字经济促进产业结构升级:机理、堵点与路径》,《理论学刊》,2021年第3期。

⑦高维龙,彭影,胡续楠:《“双碳”目标下数字经济对城市节能减排的影响研究》,《城市问题》,2023年第3期;冯兰刚,阳文丽,王忠,樊向波:《中国数字经济与城市碳排放强度:时空演化与作用机制》,《中国人口·资源与环境》,2023年第1期。

⑧王山,余东华:《数字经济的降碳效应与作用路径研究——基于中国制造业碳排放效率的经验考察》,《科学学研究》,2023年第5期;余畅,马路遥,曾贤刚,马冬妍:《工业企业数字化转型能否促进节能减排?》,《中国环境科学》,2023年第1期。

⑨Grossman G. M. , Krueger A. B. , Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement, *NBER Working Paper*, No. 3914, 1991, pp. 1-57.

泉说”“收入效应说”“门槛效应说”和“规模报酬递增型减排技术说”[①]。从实证检验方面看，研究结果可以分为两类：(1)碳排放与经济增长呈“倒U型”关系，但碳排放拐点的位置具有明显差异[②]；(2)碳排放和经济增长之间的关系具有多样性，如“N型”，单调递增[③]。

综合以上研究可以看出，在数字经济发展对碳排放与经济发展之间的关系讨论上，多是从数字经济对经济发展或者二氧化碳排放的两两讨论，忽略了经济发展与环境污染关系作为一个经典命题，一个需要权衡的现实抉择下，发展数字经济后对这二者关系影响的探讨。基于以上研究发现，本文尝试进行以下两方面的创新：(1)在理论构建方面，结合数字经济发展和经典的环境库兹涅茨曲线，构建具有数字经济影响的碳排放与经济关系理论模型；(2)在实证检验方面，首先检验中国碳排放与经济发展之间的关系，然后引入数字经济比较模型的前后变化，然后分城市群和产业结构探讨碳排放库兹涅茨曲线的形态与拐点，为理论模型的适用性和可靠性提供佐证，也为节能减排政策的设计提供参考。

二、理论分析与研究假设

为分析数字经济对碳排放和经济发展关系的影响，分以下两个部分展开。

(一)经典的环境库兹涅茨曲线推导

假设完全竞争市场下，个人和社会在成本与收益方面是相等的。个人和社会的收益取决于人均收入(Y)和环境效益(E)两个方面，如果要在发展经济的过程中进行环境保护，则要付出相应的成本。因此，个人收益最大化的目标函数可以表示为：

$$\max NP = B(E,Y) - C(E,Y) \tag{1}$$

其中NP表示个人净收益，B表示个人获得的经济和环境收益，C代表个人为改善环境所付出的成本。如果要实现个人净收益最大化，在人均收入不变的情况下，需要边际收益等于边际成本：

$$EMB - EMC = 0 \tag{2}$$

式(2)中$EMB = \partial B/\partial E$，$EMC = \partial C/\partial E$。

为分析人均收入变动对个人收益均衡的影响，可对式(2)求人均收入Y的导数：

$$(EMB_Y - EMC_Y) + (EMB_E - EMC_E)(dE/dY) = 0 \tag{3}$$

为便于分析，令$dE/dY = a$对式(3)进行整理得：

$$a = [\,dE/dY\,]_{E=E^*} = (EMB_Y - EMC_Y)/(EMC_E - EMB_E) \tag{4}$$

可以看到，环境污染状况随人均收入变动而发生的变化取决于a。如果$a > 0$，则表示环境污染会随着人均收入的增加而加剧，反之，则表示环境污染会随着人均收入的增加而下降。经济发展初期，当收入水平位于Y_0处即收入水平较低时，EMB_{Y_0}和EMC_{Y_0}在F点相交。随着人均收入的增加($Y_0 \rightarrow Y_1 \rightarrow \ldots \rightarrow < Y_4$)，$EMB_{Y_0}$和$EMC_{Y_0}$都向上移动，形成了五个平衡点F、G、H、I、J，映射到下

①López R. , The Environment as a Factor of Production: The Effects of Economic Growth and Trade Liberalization, *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 27, No. 2, 1994, pp, 163-184; Jones L. E. , Manuelli R. E. , A Positive Model of Growth and Pollution Controls, *NBER Working Paper*, No. 5205, 1995, pp. 1-59; Andreoni J. , Levinson A. , The Smple Analytics of the Environmental Kuznets Curve, *Journal of Public Economics*, Vol. 80, No. 2, 2001, pp. 269-286.

②盛晓菲：《政绩诉求、经济高质量发展与雾霾污染》，《山西财经大学学报》，2022年第7期。

③Friedl B. , Getzner M. , Determinants of CO2 Emissions in a Small Open Economy, *Ecological Economics*, Vol. 45, No. 1, 2003, pp. 133-148；胡宗义，唐李伟，苏静：《碳排放与经济增长：空间动态效应与EKC再检验》，《山西财经大学学报》，2013年第12期。

半部分的点后,连线生成了旋转90度的环境库兹涅茨曲线,如图1所示。

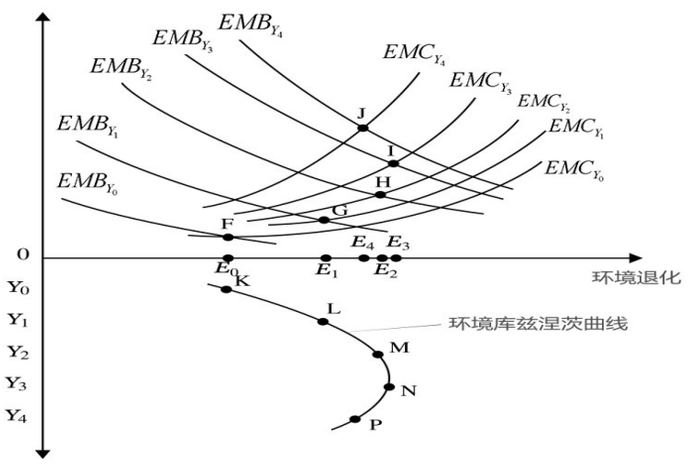


图1　经典环境库兹涅茨曲线推演过程

假说1:碳排放作为环境污染的代表,会随着经济发展先升后降,呈现出"倒U型"。

(二)加入数字经济的库兹涅茨曲线

数字经济发展会影响到经济增长发展和环境治理中的投入和回报。(1)从投入角度来看:数字经济发展丰富了要素市场的投入类型,提高了市场运行的透明度,提升了生产效率,节约了经济投入成本。在环境方面,数字经济在一定程度上增加了电力消耗和二氧化碳排放,但同时也降低了能源消耗和二氧化碳排放的强度。因而,数字经济发展通过促进资源优化配置和信息传递,降低环境边际成本。(2)从收益角度来看:数字经济会从微观、宏观等不同层面,促进经济发展水平提高。在经济发展水平提高后,居民在绿色产品方面支付能力和支付意愿将会提高。借助数字经济提供的便捷的信息传递,企业可以更加迅速和全面地获得居民消费偏好,从而调整自己的生产和经营。因此,在数字经济发展的推动下,居民和企业都容易获得更高的环保效益。

假定数字经济可以通过改善环保消费偏好(P)影响环境边际收益EMB,通过促进资源优化配置和信息传递(I)影响环境边际成本EMC,从而影响经济和环境的均衡。基于此,式(2)可改写为:

$$EMB(E,Y,P)=EMC(E,Y,I) \tag{5}$$

基于式(5),可知加入数字经济后的式(4)可改写为:

$$dE=\frac{[(EMB_Y-EMC_Y)dY]}{EMC_E-EMB_E}+\frac{[(EMB_P dS-EMC_I dT)]}{EMC_E-EMB_E} \tag{6}$$

数字经济的发展可以提高居民的环保消费偏好,降低资源配置成本,有$EMB_P>0$、$EMC_I<0$。因此,数字经济发展将有利于改善环境污染排放状况,提前(AEB_2GC)或者以较低(ADB_1EC)的状态达到环境污染和人均收入之间的"倒U型"拐点,实现在安全线下的"穿越",如图2所示。鉴于上述分析,本文提出第二个假设。

假说2:数字经济会促进碳排放库兹涅茨曲线顶点的下降或提前。

以上对环境库兹涅茨曲线的比较静态分析为一般情形,适用于一般国情的分析,但在区域和产业层面应有所差异。(1)从区域层面来看,中国不同城市群之间存在显著的经济环境差异,这主要表现在以下几个方面:第一,城市群之间由于地理位置和资源禀赋等不同已经形成了显著的区域性差距。第二,城市群间能源消费结构也不同。经济发达地区的城市群中第三产业和高新技术产业占比较高,能源消费以电力为主,结构相对多样化。而广大中西部地区的城市群较多地依赖

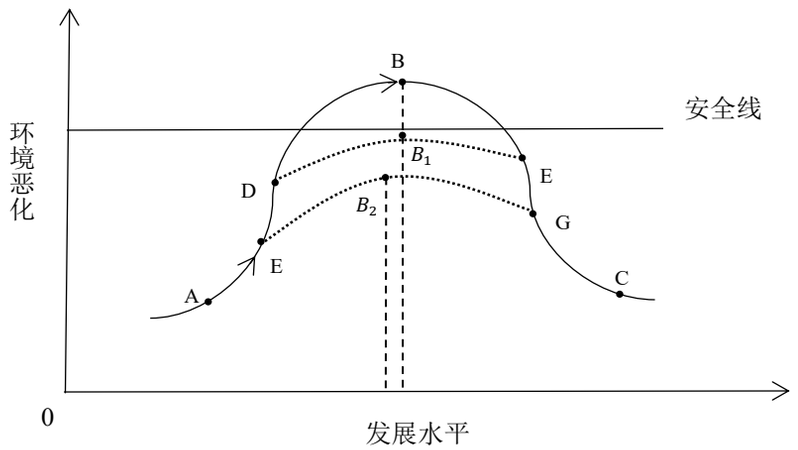


图2　加入数字经济因素后的环境库兹涅茨曲线

煤炭和石油等传统能源。第三，数字化发展水平在不同地区存在显著差异。东部地区的中长江三角洲城市群、珠江三角洲城市群等数字基础设施相对完善，数字技术应用场景较为丰富；而中西部地区如中原城市群、关中城市群等数字经济水平相对落后。这种差异对经济发展和二氧化碳排放的影响也将有所不同。(2)从产业层面来看，产业结构决定了城市群的生产方式和生产效率，影响着经济和环境之间的关系，以及数字经济发展的水平和作用。一般来说，重工业和制造业等能源密集型产业会产生较多的二氧化碳排放，而服务业和知识密集型产业的碳排放则相对较低。同时，服务业和知识密集型产业的附加值通常会高于重工业和制造业。因此，产业结构更偏向服务业和知识密集型产业的地区，其经济发展水平通常会更高，同时二氧化碳排放也相对较低。结合数字经济的发展水平的区域性差异，在不同的产业结构下，数字经济对经济发展水平和二氧化碳排放的影响也将有所不同。因而，本文提出第三个假设：

假设3：碳排放和经济发展关系将在不同区域和产业结构背景下有所差异，数字经济的影响也将有所不同。

三、模型设定、样本选取和数据来源

(一)模型设定

在理论推导和以往研究的基础上，本文设定碳排放和经济增长之间的函数关系，并引入数字经济变量，以验证中国的碳排放和经济增长关系。方程设定为：

$$CE_{it} = \alpha + \beta_1 PGDP_{it} + \beta_2 PGDP_{it}^{\ 2} + \lambda_1 DE_{it} + \gamma X + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中CE_{it}为i城市t时期的碳排放量；$PGDP_{it}$为i城市t时期的人均GDP；DE_{it}为i城市t时期的数字经济发展水平；α是常量，β为人均GDP一次和二次方的系数、λ_1为数字经济的系数，γ为控制变量的系数，ε_{it}为随机误差项。当β_2=0或者不显著时，碳排放与经济增长为线性相关；当$\beta_2 < 0$时，碳排放与经济增长为“倒U型”关系，拐点为$-\beta_1/2\beta_2$；当$\beta_2 > 0$时，碳排放与经济增长为“U型”关系。

(二)样本选取

本文以2003—2020年间中国281个城市为对象，展开实证分析。主要变量定义和来源如下：

1. 被解释变量(CE)。本文采用碳排放量作为被解释变量。本文参考碳排放核算边界的研

究[①],取辖区内的直接排放(如能源活动、工业生产、农业等产生的温室气体排放),辖区外的与能源相关的间接排放(如为城市提供二次能源产生的排放),以及由城市内部活动引发的没被上一个范围包括的间接排放。数据来源于中国碳核算数据库,时间区间为2003—2020年。

2. 核心解释变量。(1)经济发展水平(*PGDP*)。人均GDP更能较好的反映不同城市间的经济发展水平。为了消除价格波动,文章将人均GDP折算为以2003年为基期的不变价格。(2)数字经济(*DE*)。本文借鉴韦施威的研究思路[②],从互联网发展的指标来衡量数字经济发展水平。选用每百人互联网宽带接入用户数、计算机软件从业人员占城镇单位从业人员比重、人均电信业务总量和每百人移动电话用户数四个指标,运用线性插值法填补缺失值,然后将这四个指标标准化,最后使用主成分分析法测度出城市间的数字经济发展指数。数据来源于2004—2021年的《中国城市统计年鉴》。

3. 控制变量(*X*)。本文参考肖振红[③],林伯强[④]和杨志明[⑤]等的研究,选择产业结构、金融发展、人口规模和政府干预等影响能源消耗和碳排放的因素。数据主要来源于2004—2021年间的《中国城市统计年鉴》和Wind数据库。

表1　变量统计性描述

变量	定义	均值	标准差	最小值	最大值	样本量
碳排放量(*CE*)	二氧化碳排放量(百万吨)标准化	0.000	1.000	−1.039	8.606	5021
人均GDP(*PGDP*)	人均GDP(元)标准化	0.000	1.000	−1.155	13.274	5021
数字经济	主成分计算互联网发展指标	0.002	1.112	−1.165	12.571	5021
产业结构	第三产业产值/第二产业产值	0.933	0.513	0.080	5.350	5021
金融发展	金融机构贷款余额/GDP	0.892	0.553	0.075	9.622	5021
人口规模	常住人口标准化	0.000	1.000	−1.175	11.074	5021
城镇化率	城镇人口/人口规模	51.788	16.690	8.051	100.000	5021
政府干预	财政支出/GDP	0.174	0.115	0.003	2.267	5021

注:为避免量纲不统一造成的结果偏差,采用极值法对碳排放、人均GDP和人口规模数据进行标准化。

四、基于整体城市的实证检验与分析

(一)城市面板数据回归分析

基于城市样本数据,实证检验数字经济对碳排放库兹涅茨曲线的影响,基准回归结果如

①丛建辉,刘学敏,赵雪如:《城市碳排放核算的边界界定及其测度方法》,《中国人口·资源与环境》,2014年第4期。

②韦施威,杜金岷,潘爽:《数字经济如何促进绿色创新——来自中国城市的经验证据》,《财经论丛》,2022年第11期。

③肖振红,谭睿,安芮,罗晓梅:《市场激励型环境规制与区域绿色创新效率——基于产业结构优化的中介作用和财政分权的调节作用》,《系统管理学报》,2023年第5期。

④林伯强,徐斌:《研发投入、碳强度与区域二氧化碳排放》,《厦门大学学报》(哲学社会科学版),2020年第4期。

⑤杨志明:《"双碳"目标背景下中国重点城市低碳发展格局及其驱动机制研究》,《贵州社会科学》,2023年第2期。

表2所示。

表2　模型整体回归结果（观测值N= 5021）

变量	（1） *CE*	（2） *CE*	（3） *CE*	（4） *CE*
PGDP	0.415***	0.325***	0.389***	0.310***
	（68.08）	（33.80）	（50.48）	（30.47）
$PGDP^2$	−0.031***	−0.024***	−0.030***	−0.023***
	（−22.03）	（−15.60）	（−20.28）	（−14.71）
数字经济			0.041***	0.034***
			（5.570）	（4.597）
控制变量	不控制	控制	不控制	控制
R^2	0.479	0.507	0.482	0.509
临界值θ_t	6.627	6.690	6.591	6.689
Lower bound Slope	0.488	0.381	0.457	0.363
Upper bound Slope	−0.416	−0.319	−0.394	−0.305
T值	11.92	8.84	11.25	8.41
$p>\|t\|$	0.000	0.000	0.000	0.000
是否通过	通过	通过	通过	通过
二氧化碳排放拐点	59.662	52.633	57.375	51.377
人均GDP拐点	25.324	25.517	25.194	25.517

注：*、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平上显著，括号内为t值，回归均控制城市和年份两个方面。

由城市面板数据的回归结果来看，分三个层面进行解释：

第一，从整体上看，在不考虑数字经济（第1列）、不考虑数字经济但加入控制变量（第2列）、加入数字经济（第3列）以及加入数字经济和控制变量（第4列）的设定下，人均*GDP*一次项的系数在0.310~0.415之间，二次项系数均在-0.031~-0.023之间，且*P*值小于0.05，具有良好的解释性。根据以上结果可以判断，中国城市的二氧化碳排放与人均GDP之间的关系，都符合经典环境库兹涅茨曲线的“倒U”型曲线特征。即假设1是成立的。

第二，在加入数字经济以后，数字经济发展会显著地促进二氧化碳排放量的增加，但也会改善二氧化碳排放与经济发展之间的关系。很多的研究都是从数字经济系数的正负性上来考虑对二氧化碳排放的影响关系，如高维龙认为数字经济的发展促进了城市电力等能源的消耗，产生了大量的二氧化碳排放，但数字经济也降低了二氧化碳排放的强度①。这种判定忽略了数字经济引入后，碳排放与经济发展关系的变动。为了进一步验证这一影响关系，本文采用边际分析，绘制不同变量控制下的二氧化碳排放与经济发展关系图。从下图3可知，考虑数字经济和控制变量时，碳排放的顶点会相对于不考虑数字经济的情况下，更靠近原点。这意味着，数字经济的发展会使得二氧化碳与经济发展拐点提前，假设2也是成立的。

①高维龙，彭影，胡续楠：《“双碳”目标下数字经济对城市节能减排的影响研究》，《城市问题》，2023年第3期；向宇，郑静，涂训华：《数字经济发展的碳减排效应研究——兼论城镇化的门槛效应》，《城市发展研究》，2023年第1期。

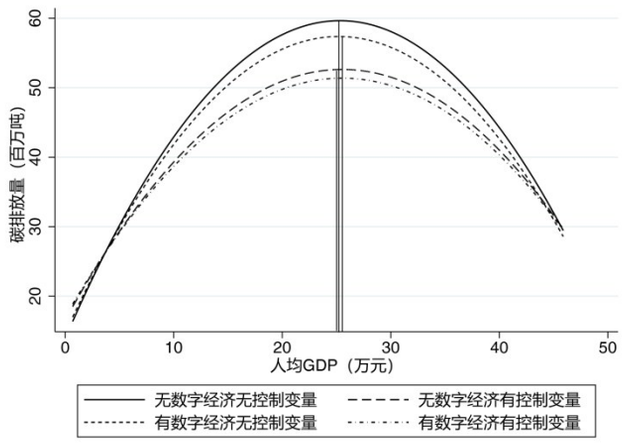


图3　不同状态下二氧化碳排放与经济发展关系

第三，在确定“U型”或“倒U型”关系时，仅仅根据核心解释变量的二次项系数是否显著是不够严谨的。如果样本数据呈现单调凸性，或者阶段性凸性，核心解释变量的二次项系数也可能显著，从而导致虚假的“U型”或“倒U型”关系，也无法排除三次型或更高次型的情况。本文对二氧化碳与经济发展之间的“倒U型”关系进行了更加严谨的UTest检验。结果显示，人均GDP对二氧化碳排放影响的临界值为6.627~6.690，均落在人均GDP的取值范围内，Utest检验也均在1%水平上通过了“倒U型”关系检验，进一步证实了“倒U型”关系。同时，结果中的斜率均表现为下限斜率（Lower bound Slope）为正，上限斜率（Upper bound Slope）为负，呈现出先增长后下降的形态，验证了经济发展水平与二氧化碳排放的“倒U型”关系，并排除了可能存在的三次型或更高次型的可能性。

（二）稳健性检验

1. 内生性检验

上述回归结果符合经典假设和一般性研究结果，但是可能存在遗漏变量或者自变量和因变量间存在互为因果关系，从而导致内生问题。对此，本文采用1984年地市级的每百万人邮局数量和固定电话数量作为工具变量，对主模型进行检验。其中在（1）、（2）列中采用每百万人邮局数量作为数字经济的工具变量进行两阶段回归，（3）、（4）列是采用每百万人固定电话数量作为数字经济的工具变量进行两阶段回归，估计结果如下表3所示。可以看到第（1——4）列中，人均生产总值*PGDP*的一次项均为正、平方项为负，都通过了显著性水平检验，说明模型均符合“倒U型”曲线特征，与基准回归结果一致。识别不足检验中的LM统计值和内生性检验中的$\chi^2(1)$统计量均通过检验，弱工具变量检验中的F统计值均大于10，也通过检验。结果证明了基准回归的稳健性。

2. 调整样本期

考虑到时间周期的选择可能会影响到回归结果，本文将样本期缩短至2006—2018年，以便排除过早时期对二氧化碳不够重视以及近年来对二氧化碳排放过于严苛可能造成的极端影响。通过表4可以看出，将样本期适当缩短以后，回归结果的系数和显著性并没有发生明显变化。由于样本量大幅减少，导致R^2在不同模型下的有所下降也属于正常情况，说明了基础回归的结论具有稳健性。

3. 变量缩尾的再检验

中国不同城市间的社会经济发展差距较大，为了控制变量可能存在的极端值，本文对样本进行了5%分位上双边缩尾后，重新进行了回归。通过表5的回归结果可以看出，对变量进行双边缩尾后的估计结果与前文基本一致，即回归结果具有较高程度的稳健性。

表3　工具变量法第二阶段估计结果（观测值N =4013）

变量	（1） *CE*	（2） *CE*	（3） *CE*	（4） *CE*
PGDP	0. 122*** （3. 46）	0. 714*** （5. 01）	0. 094** （2. 75）	0. 351*** （4. 51）
$PGDP^2$	−0. 014* （−1. 81）	−0. 047*** （−3. 87）	−0. 012** （−2. 96）	−0. 059*** （−3. 56）
数字经济	0. 356*** （8. 50）	0. 547*** （4. 59）	0. 411*** （3. 67）	0. 265*** （4. 82）
识别不足检验： LM统计量（P值）	18. 040 （0. 000）	14. 683 （0. 000）	16. 217 （0. 000）	15. 411 （0. 000）
弱工具变量检验： F统计量	41. 654	74. 650	215. 945	102. 346
内生性检验： 统计量（P值）	80. 15 （0. 000）	213. 37 （0. 000）	80. 22 （0. 000）	233. 83 （0. 000）
城市固定效应	控制	不控制	控制	不控制
年份固定效应	不控制	控制	不控制	控制

注：*、**、***分别表示在10%、5%、1%的水平上显著，下同。

表4　调整样本期的估计结果（观测值N =3348）

变量	（1） *CE*	（2） *CE*	（3） *CE*	（4） *CE*
PGDP	0. 292*** （43. 45）	0. 222*** （21. 73）	0. 267*** （34. 18）	0. 206*** （19. 47）
$PGDP^2$	−0. 020*** （−18. 43）	−0. 015*** （−12. 23）	−0. 018*** （−16. 07）	−0. 014*** （−10. 97）
数字经济			0. 042*** （6. 36）	0. 037*** （5. 51）
控制变量	不控制	控制	不控制	控制
R^2	0. 335	0. 373	0. 344	0. 379

（三）异质性分析

1. 基于城市群的异质性分析

为了探索区域异质性，将281个城市按照十大城市群分类，验证各城市群碳排放量与人均GDP之间是否存在“倒U型”关系，以及数字经济是否会对碳排放与经济发展之间的关系产生影响，使碳排放环境库兹涅茨曲线拐点向原点平移，提前实现“碳达峰”。表6和表7分别是数字经济变量引入前后的估计结果。

表5　双边缩尾处理后的估计结果

	(1)	(2)	(3)	(4)
变量	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*
PGDP	0.418***	0.314***	0.381***	0.275***
	(79.71)	(30.17)	(45.26)	(22.64)
$PGDP^2$	−0.106***	−0.098***	−0.098***	−0.086***
	(−20.71)	(−13.86)	(−17.37)	(−12.13)
数字经济			0.050***	0.074***
			(4.44)	(5.61)
控制变量	不控制	控制	不控制	控制
观测值	4,088	2,766	3,749	2,622
R^2	0.598	0.603	0.581	0.584

表6　不考虑数字经济变量下十大城市群估计结果

分组	(1) 京津冀	(2) 长三角	(3) 珠三角	(4) 长江中游	(5) 成渝	(6) 海峡西岸	(7) 山东半岛	(8) 辽中南	(9) 中原	(10) 关中
变量	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*
PGDP	0.879***	0.342***	0.169***	0.237***	0.612***	0.229***	0.698***	0.515***	0.687***	0.228***
	(7.32)	(5.35)	(5.99)	(9.42)	(3.85)	(5.77)	(6.95)	(14.27)	(8.59)	(3.82)
$PGDP^2$	−0.215***	−0.058***	−0.012***	−0.061***	−0.091	−0.057***	−0.107***	−0.068***	−0.229***	−0.012
	(−7.00)	(−4.36)	(−5.54)	(−5.19)	(−1.04)	(−4.82)	(−6.35)	(−3.84)	(−6.19)	(−0.23)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R^2	0.810	0.612	0.638	0.688	0.515	0.644	0.664	0.716	0.860	0.750
形态	“倒U”	“倒U”	“倒U”	“倒U”	线性递增	“倒U”	“倒U”	“倒U”	“倒U”	线性递增
二氧化碳排放顶点	84.266	57.79	42.905	26.638	无	26.509	60.523	49.663	46.162	无
人均GDP顶点	10.536	13.345	27.293	10.213	无	10.439	14.41	16.057	8.76	无

从表6和表7的估计结果可以得到以下结论:(1)除成渝城市群和关中城市群外,多数城市群之间的二氧化碳排放与经济发展之间则为“倒U型”关系,符合经典库兹涅茨曲线的形态;数字经济的发展并没有从根本上改变各个城市群的二氧化碳排放与经济发展之间的“倒U型”关系;除成渝和关中城市群外,其它城市群的Utest检验均通过检验,也证明了不同城市群中二氧化碳排放与经济发展关系的可靠性;(2)除京津冀地区的数字经济系数为负,其它地区的数字经济系数均为正值。这意味着,除了京津冀地区的数字经济发展起到降低了二氧化碳排放的作用,而其它城市群的数字经济发展都在不同程度上促进了二氧化碳排放量的增加。这一研究结论与姜汝川的研究结论相符①。(3)数字经济虽然很难直接起到降低二氧化碳排放的作用,但引入数字经济后,二氧化碳排放和经济发展之间的拐点向原点平移。这意味着数字经济对于改善二氧化碳排放和经济发

①姜汝川,景辛辛:《京津冀地区数字经济发展对碳排放的影响效应——来自2011-2019年13个地级及以上城市的经验证据》,《北京社会科学》,2023年第4期。

展之间的关系具有重要意义。

表7　考虑数字经济变量下十大城市群估计结果

分组	(1) 京津冀	(2) 长三角	(3) 珠三角	(4) 长江中游	(5) 成渝	(6) 海峡西岸	(7) 山东半岛	(8) 辽中南	(9) 中原	(10) 关中
变量	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*
PGDP	0.946***	0.310***	0.148***	0.207***	0.588***	0.226***	0.695***	0.480***	0.688***	0.172***
	(7.97)	(4.81)	(5.31)	(7.53)	(3.37)	(5.75)	(6.23)	(10.30)	(8.68)	(2.84)
$PGDP^2$	−0.221***	−0.058***	−0.010***	−0.059***	−0.089	−0.060***	−0.107***	−0.064***	−0.263***	−0.017
	(−7.37)	(−4.37)	(−4.84)	(−5.10)	(−1.01)	(−5.11)	(−5.80)	(−3.56)	(−6.44)	(−0.33)
数字经济	−0.142***	0.091***	0.034***	0.060***	0.024	0.047**	0.004	0.062	0.065*	0.103***
	(−3.48)	(2.60)	(3.55)	(2.63)	(0.35)	(2.23)	(0.06)	(1.17)	(1.89)	(2.97)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R^2	0.819	0.619	0.664	0.692	0.512	0.651	0.661	0.716	0.862	0.769
形态	“倒U”	“倒U”	“倒U”	“倒U”	线性递增	“倒U”	“倒U”	“倒U”	“倒U”	线性递增
二氧化碳排放顶点	87.044	56.584	41.733	25.354	无	26.134	60.453	47.936	44.951	无
人均GDP顶点	10.827	12.538	27.616	9.535	无	9.987	14.41	15.928	8.147	无

2. 基于产业结构的异质性分析

为了进一步探究二氧化碳排放与经济发展之间的关系在不同产业结构下的表现，对样本按产业结构高级化程度（第三产业增加值/第二产业增加值）进行了三等分检验，从估计结果表8可以看出：

（1）二氧化碳排放与人均GDP关系中，产业高级化程度较低的一组呈线性递增关系，产业高级化程度居中和较高地区呈现了“倒U型”关系。除产业化高级化程度较低的城市群外，其它城市群

表8　分产业估计结果

分组	(1) 低	(2) 中	(3) 高	(4) 低	(5) 中	(6) 高
变量	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*	*CE*
PGDP	0.264***	0.310***	0.350***	0.269***	0.304***	0.327***
	(15.27)	(16.12)	(18.10)	(14.55)	(15.59)	(16.10)
$PGDP^2$	−0.001	−0.037***	−0.028***	−0.002	−0.038***	−0.026***
	(−0.26)	(−6.84)	(−13.14)	(−0.38)	(−7.00)	(−11.97)
数字经济				−0.013	0.024*	0.038***
				(−0.81)	(1.71)	(3.40)
控制变量	控制	控制	控制	控制	控制	控制
R^2	0.514	0.570	0.469	0.514	0.571	0.472
形态	线性递增	“倒U”	“倒U”	线性递增	“倒U”	“倒U”
二氧化碳排放顶点	无	43.179	56.185	无	42.197	54.45
人均GDP顶点	无	17.445	24.193	无	16.8	24.193

的Utest均通过了显著性检验,也证明了不同产业结构下的二氧化碳与人均GDP关系的可靠性。(2)数字经济会显著地促进产业高级化程度居中以及较高地区的二氧化碳排放。(3)数字经济会使得工业发达地区的二氧化碳排放与经济发展的线性递增关系更加陡峭,使得产业高级化程度居中和较高地区的二氧化碳排放与人均GDP的拐点向原点平移。

根据十大城市群和产业高级化程度的异质性分析可以看出,假设3是成立的。

五、主要结论与政策建议

本文重新推演了数字经济发展下的环境库兹涅茨曲线,运用2003—2020年间的城市面板数据进行了实证检验,得出如下结论:(1)中国的碳排和人均GDP整体上符合经典的环境库兹涅茨曲线假说,呈现先升后降的"倒U型"。(2)数字经济会造成二氧化碳排放量的增加,但也促进了中国城市二氧化碳排放与经济发展之间拐点的提前到来。(3)二氧化碳排放与经济发展之间的关系,以及数字经济在调节碳排放和经济发展关系方面的作用,具有显著的区域和产业异质性。根据以上研究结果,本文拟提出以下几点政策建议:

第一,相机抉择节能减排与经济增长的双重目标。考虑到中国的碳排放与人均GDP呈现先升后降的"倒U型",政府可以根据经济和环境的基本状况采取相应的政策措施。如经济增长过快时,可以积极地展开能源绿色低碳转型,执行相对严格的节能减排方案,在防止经济过热的同时促使"双碳"目标的提前实现。而当经济增长放缓时,则可以适度把握节能减排的力度,以经济建设为中心,保障社会经济的稳定运行。

第二,有序推动数字经济与低碳经济的深度融合。基于数字经济对于经济发展和二氧化碳兼容性的促进效用,以"数字中国"为契机,全面推进数字基础设施建设,释放数字经济在促进经济发展和环境改善方面的红利。同时,要在条件成熟的城市拓展和深化智慧城市试点建设,实现数字技术的绿色创新和应用,总结数字经济在物流运输、能源供应和环境治理等方面的应用方案,进而推广至条件相吻合的城市群,全面实现数字经济与低碳经济的深度融合。

第三,"因地制宜"推进数字经济,兼顾经济发展和二氧化碳排放目标。尤其应当关注二氧化碳排放与经济发展之间还保持单调递增关系的关中城市群和成渝城市群,以及碳排放顶点较高的京津冀城市群。其中,关中城市群作为能源富集区,要积极开展智慧型能源城市建设,推动能源产业的高级化,避免可能形成的"资源诅咒"。成渝城市群近年来发展较快,要积极结合当地的水能和天然气优势,发挥数字经济在智慧电网中的优势进行电气化转型。京津冀城市群工业发达,煤炭依赖严重,要结合城市功能定位积极进行工业格局调整,实现区域的电气化转型。

第四,"因产制宜"推进数字化,促进碳减排和经济发展的协调运行。尤其应当关注工业占比较高城市群,因为它们的二氧化碳和经济发展之间还保持着单调递增的关系。中国制造2025计划尚在进行中,应当充分借助数字化、智能化的手段,在工业发达的城市群中应用新一代信息技术,与制造业相结合,提高科技创新和成果转化应用能力。以数字化驱动工业4.0,实现工业增加值的快速增长和单位污染能耗的有效降低。

[责任编辑:袁朋伟]