数实融合对黄河流域城市碳减排的影响

吴 江，东方社岐

（西安财经大学统计与数据科学学院，西安 710100）

摘要：采用2013—2022年黄河流域76个地级市的面板数据，构建双固定效应模型进行实证分析。结果表明，数字经济与实体经济的融合显著促进了黄河流域城市碳排放强度的下降和碳排放的减少。经过多次稳健性检验，这一结论仍然有效。机制检验表明，通过优化资源配置和提高技术创新水平，数字经济与实体经济的融合显著促进了流域城市碳排放的减少。异质性分析表明，数字经济与实体经济融合对黄河流域城市碳排放的影响在区域和资源型城市类型上存在异质性。此外，数字经济与实体经济融合对黄河流域城市的减碳效应也因政府对绿色发展的重视而得到有效加强。

关键词：数实融合；碳减排；双重固定效应模型；黄河流域

中图分类号：F062.9 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)05－0087－08

2025年1月，生态环境部出台的《关于建设美丽中国先行区的实施意见》指出，将黄河流域纳入美丽中国先行区建设重点区域，要求协同推进高水平保护与绿色低碳发展。作为连接中国东西部的经济文化纽带与高质量发展重要增长极，黄河流域既是传统能源、重工业和化工产业的集中分布区，也是气候变化的敏感区，流域内水土流失、水资源短缺等生态脆弱性问题逐渐显现。近年来，随着东部高耗能产业向中西部转移，流域内不同城市工业碳排放差异进一步凸显，碳排放治理的复杂性与紧迫性持续上升[1]。在数字化浪潮背景下，数实融合为破解黄河流域碳排放困境提供了新思路。数字信息技术向传统制造业的渗透融合促使制造业引入数字孪生技术、优化工艺参数、降低能源消耗，促进企业创新型转型[2]。同时，数实融合通过优化资源配置、推动传统产业转型升级，有效提升全要素生产率，重塑实体经济的生产方式与组织模式，从整体上促进城市绿色转型[3]。这不仅是黄河流域探索绿色低碳发展新模式的关键抓手，更是响应全球可持续发展议程、落实“双碳”目标的重要路径。因此，深入探讨数实融合对黄河流域城市碳减排的影响及作用机制，对推动黄河流域绿色转型、服务美丽中国先行区建设与新发展格局战略具有重要意义。

1 文献综述

在数字经济浪潮持续推进的背景下，数实融合成为推动经济高质量发展的重要引擎，对于区域经济转型与可持续发展都有着深远影响。中国黄河流域面临生态保护与高质量发展的双重任务，数实融合更是被寄予厚望，是扭转高耗能、高排放的传统工业化模式的重要抓手[4]。探讨数实融合是否及如何对碳减排产生影响是必要的。

多数学者认为数字经济的发展对碳排放存在抑制作用。数字技术在新兴产业高质量发展中的驱动作用，可以进一步激发数字化转型和可持续绿色经济发展的需求，进而发挥节能降碳的效用[5]。Liu等[6]认为数字技术促进了绿色技术进步，推动了产业结构升级，对生产环节进行了精细化改造，以降低能源消耗、减少碳排放。曹增栋和岳中刚[7]认为发挥数字技术优势的主要途径就是数字经济与实体经济相融合。大多数研究聚焦于数字经济对碳排放的影响，较少关注数实融合是否及如何对碳减排产生影响。

目前，有关数字经济与实体经济融合的研究聚集在内涵定义、指标测度和研究路径等方面。在内涵方面，洪银兴和任保平[8]认为数实融合是把作为生产要素的数据渗透到实体经济生产流通的全过程。徐妍等[9]认为数实融合本质上是数字经济向实

收稿日期：2025-10-10

基金项目：西安财经大学研究生创新基金(24YC010)

作者简介：吴江(2001—)，男，陕西宝鸡人，硕士研究生，研究方向为统计测度与评价；通信作者东方社岐(1964—)，男，陕西扶风人，硕士，教授，研究方向为经济统计学、统计测度与评价。

体经济渗透的过程。在测度方面，史丹和孙光林[10]采用耦合评价模型测度省级数实融合水平，发现数实融合水平整体呈现上升趋势。在研究路径方面，朱峻质[11]提出要探索包括技术创新路径、产业升级路径以及市场拓展路径等来促进高质量融合发展。还有部分学者关注到数实融合的影响效应。谭蓉娟和周梓怡[12]认为数实融合推动实体产业的技术创新与结构升级，助力实体经济的高质量发展。温军和刁宇[13]发现数实融合使数字产业集群通过技术渗透实现了实体经济全要素生产率提升与价值链条重构，为产业创新提供新路径。

综上所述，现有研究对数实融合的经济效益关注度高，而从环境视角研究数实融合文献较少，且相关研究大多立足于国家层面以省级数据为基础研究数实融合影响效应。为此，使用2013—2022年黄河流域76个地级市的面板数据，深入分析数实融合对碳减排的影响及作用机理，从资源配置优化和技术创新方面实证分析数实融合对碳减排的影响机制，有助于企业绿色转型。此外，深入探讨不同区域城市、不同资源基础城市能否依托数实融合实现碳减排。同时，对政府绿色发展注意力在数实融合的碳减排效应中所发挥的作用进行深入分析，为黄河流域绿色低碳转型提供合理建议，放大数实融合的降碳效应。

2 理论分析与研究假设

2.1 数实融合对黄河流域城市碳减排的直接影响

数实融合为黄河流域城市产业结构升级提供了强大驱动力，打破了知识传播的时空壁垒，促进了城市与企业跨领域间的知识共享与创新[14]。数据要素、新兴信息技术和数字平台等优势带动工业进行技术更新、成本优化、生产模式转变等方式实现生产过程数字化[15]。在此过程中以人工智能、区块链为代表的数字技术正重构产业链组织形态，驱动企业管理范式革新与全要素生产率提升。数实融合能够推动传统产业的数字化转型升级，以高质量产业数字化发展赋能现代化产业体系建设[16]。促使产业结构朝着低碳化方向演进，从而为产业数字化转型注入强劲的动力。数实融合促进黄河流域城市改善发展模式，推动了数字金融、智能制造、电子商务等新兴产业的发展。这些产业不仅为资源型城市提供了多元化的经济增长点，还催生了新的就业机会，有效促进了资源型城市的可持续发展[17]，减少了长久以来许多城市“靠黄河吃黄河”的资源消耗模式。使得黄河流域城市经济发展有了更多样化的选择，既增强了城市经济的稳定性和抗风险能力，也为碳减排减少了压力。基于以上分析，提出如下假设。

H1：数实融合促进黄河流域城市碳减排。

2.2 数实融合影响黄河流域城市碳减排的机制分析

数字技术降低了信息不对称程度，打破了不同行业要素自由流动的壁垒，使劳动、资本等传统生产要素被配置到边际报酬回报率更高的行业，实现了资源的整合与协同，提高了资源配置效率[18]。资源配置效率的提高意味着同等条件下投入的能源原料减少，获得的产出更多，单位所需的能耗与产出的排放也将减少。同时，借助大数据、人工智能等数字技术，城市能够实现对资源的精准匹配，避免能源的过度供应或供应不足，提高整个城市资源利用的精准性和高效性。此外，随着生产活动的透明化，企业间竞争越加激烈，最终高耗能、高污染的企业被倒逼进行绿色创新[19]，间接地降低了城市能源消耗与资源废气排放。为此，提出如下假设。

H2：数实融合通过优化资源配置进而推动黄河流域城市碳减排。

新一代信息技术带来的积极效应为工业实现技术升级、产业链整合、成本管控能力提升提供了契机，助力产业转型升级。数实融合促进了绿色技术创新成果应用和推广。数字化创新平台的应用增强了创新成果信息共享，有利于缓解供需双方信息不对称的问题[20]。工业企业通过技术创新可以促使产品优化、工艺改良、结构升级，从而提高能源使用效率，降低单位产品碳排放量。数字技术对清洁能源的开发与应用、固碳及降碳技术的培育以及碳汇价值充分发挥积极效能，还能促进新型可再生能源开发和利用，推动可再生能源的大规模应用，提高清洁能源在能源消费总量中的比重[21]。为此，提出如下假设。

H3：数实融合通过推动技术创新进而促进黄河流域城市碳减排。

3 研究设计

3.1 模型构建

为了验证数字技术和实体经济深度融合对碳减排的影响，构建如下双重固定效应模型：

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 D_{it} + \beta_2 Z_{it} + \mu_t + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中：i、t 分别为城市和年份；CO_2 为城市碳排放强度；D 为城市数实融合水平；Z 为控制变量集合，代

表一系列可能影响碳排放的控制变量;μ_t 为时间固定效应;η_i 为城市固定效应;ε_{it} 为误差项;β_1、β_2 为系数;β_0 为常数项。

3.2　变量测度与说明

3.2.1　被解释变量:城市碳排放强度(CO_2)

采用城市方面碳排放总量与GDP比值来表征。其中,碳排放总量测算参考湛星星[22]的相关研究,采用最常用的碳排放因子法进行测算,公式为

$$CO_2 = \sum_{i=1}^{m} E_i e_i p_i \tag{2}$$

式中:E_i 为第 i 种能源消耗;e_i 为第 i 种能源的标准煤折算系数;p_i 为第 i 种能源的碳排放系数。

3.2.2　核心解释变量:数实融合水平(D)

使用耦合评价模型测算数实融合水平,具体见表1,模型如下:

$$D_{it} = \sqrt{O_{it} T_{it}} \tag{3}$$

$$O_{it} = \frac{2\sqrt{\text{digital}_{it} \times \text{rea}}}{\text{digital}_{it} + \text{real}_{it}} \tag{4}$$

$$T = \lambda_1 \text{digital}_{it} + \lambda_2 \text{real}_{it} \tag{5}$$

式中:O_{it} 为数字技术与实体经济的耦合度;T_{it} 为两者的协调度;设定 λ_1 和 λ_2 取值为0.5;digital为数字技术发展水平;real为实体经济发展水平。

3.2.3　机制变量

通过分析相关理论,选取资源配置优化与技术创新作为机制变量,以黄河流域地级市的绿色全要素能源效率反向表征资源配置优化,并从投入-产出与绿色技术创新两方面来衡量数实融合对技术创新的促进作用,具体见表1。

3.2.4　控制变量

参考项东等[23]的研究,将人均收入、人口密度、城镇化率、外资利用、能源消耗作为控制变量纳入模型。主要变量说明及变量描述性统计见表2。

表1　数字技术和实体经济发展水平测度指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位	性质
数字技术	数字基础设施	每百人国际互联网用户数	户	正向
		每百人移动电话用户数	户	正向
	数字产业化	互联网宽带接入端口数	万	正向
		人均电信业务总量	万元/人	正向
		人均邮政业务收入	万元/人	正向
	产业数字化	信息传输、计算机服务和软件业从业人员占比	%	正向
		每百人使用计算机数	台	正向
		电子商务企业数	个	正向
	数字化治理	数字普惠金融指数	—	正向
		高等学校毕业生数/年末常住人口	%	正向
		数字技术专利申请量	件	正向
实体经济	实体经济规模	规模以上工业企业数	个	正向
		规模以上工业企业资产	亿元	正向
	实体发展潜力	限额以上批发零售贸易企业	个	正向
		科学支出占地方财政支出	%	正向
		第二产业占GDP比重	%	正向
	实体经济效益	规模以上工业企业利润	亿元	正向
		社会消费品零售总额	万元	正向
		限额以上批发零售贸易业商品销售额	万元	正向

表2　主要变量说明及描述性统计

变量名称	变量符号	变量描述	均值	标准差	最小值	最大值
碳排放强度	CO_2	ln(碳排放量/GDP)	17.270	0.915	14.712	19.050
数实融合	D	耦合协调模型	−0.392	0.481	−1.892	0.501
资源配置	RA	SBM-M-L指数	0.325	0.151	0.103	1.099
研发投入	RI	ln(企业R&D内部经费)	11.861	1.751	6.541	15.870
研发产出	RO	ln(当年专利授权数量)	7.870	1.324	4.290	11.383
绿色技术创新	GTI	ln(绿色专利授权数量)	4.967	1.509	0.000	9.129
人口密度	PS	ln(年末人口/土地面积)	−4.719	1.032	−8.679	−3.360
人均收入	GDP	ln(人均GDP)	10.826	0.557	9.037	12.456
城镇化率	UL	ln(城镇人口/全市人口)	4.129	0.194	3.691	4.568
外资利用	FI	ln(外商实际投资额/GDP)	−3.453	1.897	−9.501	4.985
能源消耗	EC	ln(煤炭消耗量)	9.629	1.314	6.250	12.265

3.3　数据来源

选取 2013—2022 年黄河流域 76 个地级市为研究对象。数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国能源统计年鉴》和国家统计局以及黄河流域各地级市统计年鉴。其中，碳排放强度按照 IPCC（联合国政府间气候变化专门委员会）规定的每种能源转换成标准煤的系数计算。机器人数据来源 IFR（国际机器人联合会），用各个城市的工业就业人数占全国总就业人数的百分比乘以全国各行业机器人安装数量测算密度。政府节能降碳注意力的原始文本来源于各地级市政府官网公布的政府工作报告，绿色技术创新数据来自 CNRDS（中国研究数据服务平台），缺失值采用插值法进行补充。

4　实证分析

4.1　基准回归

基准回归结果见表 3。其中，第（1）列没有加入控制变量也没有控制城市固定效应和年份固定效应，第（2）列在第（1）列基础上控制了城市和年份的固定效应，第（3）列加入控制变量，第（4）列既加入了控制变量也对城市固定效应与年份固定效应做了控制。结果表明，在所研究的样本期间，无论是否添加了控制变量，结果都显著为负，即数实融合降低了黄河流域城市碳排放强度，促进了黄河流域城市碳减排。

表 3　基准回归结果

变量	（1）	（2）	（3）	（4）
	CO_2	CO_2	CO_2	CO_2
D	−0.377***	−0.791***	−0.510***	−0.307***
	（−5.573）	（−7.057）	（−9.636）	（−4.161）
PS			0.298***	0.315***
			（13.301）	（14.914）
GDP			0.652***	0.451***
			（9.454）	（6.649）
UL			0.096	0.109
			（0.474）	（0.574）
FI			−0.031**	−0.016
			（−2.361）	（−1.332）
EC			0.349***	0.527***
			（17.310）	（21.051）
常数项	17.124***	16.961***	7.550***	8.175***
	（407.488）	（310.590）	（13.827）	（15.941）
Control	No	No	Yes	Yes
city	No	Yes	No	Yes
year	No	Yes	No	Yes
样本数	760	760	760	760
R^2	0.039	0.067	0.565	0.629

注：*、**、***分别表示在 10%、5%、1%水平上显著；括号内为 *t* 值。

4.2　内生性检验

基于各地级市工业机器人安装密度与到杭州距离的倒数构建工具变量，回归结果见表 4。列（1）汇报了 2SLS 第 1 阶段结果，说明工具变量选取满足相关性原则。列（2）汇报了第 2 阶段工具变量的结果，发现数实融合与碳排放强度系数显著为负，数实融合依然能够显著降低黄河流域城市碳排放强度，促进城市碳减排。

表 4　内生性检验结果

变量	（1）	（2）
	D	CO_2
IV	−14.513***	
	（−8.571）	
D		−1.722***
		（−7.487）
Kleibergen-Paap rk LM 统计量	67.512	
Cragg-Donald Wald *F* 统计量	73.410	
Control	Yes	Yes
city	Yes	Yes
year	Yes	Yes
样本数	760	760

注：*、**、***表示在 10%、5%、1%水平上显著；括号内为 *t* 值。

4.3　稳健性检验

4.3.1　替换被解释变量

用单位工业增加值的碳排放强度对碳排放量进行替换，结果见表 5 列（2）。回归结果显示，在显著水平为 1%情况下，数实融合显著降低黄河流域城市工业碳排放强度，促进城市碳减排。与基准回归结果一致，证明研究结果具有稳健性。

4.3.2　缩尾处理

对面板数据进行缩尾处理，结果见表 5 列（1）。回归结果显示，在显著水平为 1%情况下，回归系数显著为负，数实融合减少黄河流域城市碳排放量，促进城市碳减排。说明研究结果与基准回归结果一致，具有稳健性。

4.3.3　调整样本周期

去除 2020—2022 年的样本数据进行回归检验，结果见表 5 列（3）。回归结果表明，在调整样本周期后的回归结果与基准回归一致，数实融合降低黄河流域城市碳排放强度，促进城市碳减排。研究结果具有稳健性。

4.3.4　去除省会城市

在去除省会城市之后进行回归分析，结果见表 5列（4）。分析结果与基准回归结果一致，均显著为负，数实融合显著降低黄河流域城市碳排放强度，促进城市碳减排，结论具有稳定性。

表 5　稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	缩尾处理	替换被解释变量	调整样本期	去除省会城市
D	−0.513***	−0.607***	−0.250**	−0.559***
	(−9.640)	(−4.952)	(−2.098)	(−9.712)
PS	0.299***	−0.311***	0.321***	0.293***
	(13.251)	(−5.991)	(11.623)	(12.240)
GDP	0.640***	−1.870***	0.657***	0.594***
	(9.074)	(−11.709)	(7.777)	(7.853)
UL	0.122	6.564***	0.018	0.165
	(0.607)	(13.964)	(0.071)	(0.661)
FI	−0.031**	−0.153***	−0.027	−0.028**
	(−2.292)	(−5.044)	(−1.556)	(−2.079)
EC	0.349***	0.388***	0.335***	0.364***
	(17.174)	(8.312)	(13.181)	(16.763)
常数项	7.574***	−10.260***	8.112***	7.723***
	(13.826)	(−8.106)	(12.090)	(12.550)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes
city	Yes	Yes	Yes	Yes
year	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	760	760	532	680
R^2	0.561	0.392	0.537	0.559

注:*、**、***分别表示在 10%、5%、1%水平上显著;括号内为 *t* 值。

4.4　异质性分析

4.4.1　区域异质性

实证分析数实融合对黄河不同流域城市的异质性影响,回归结果见表 6。由结果可知,控制城市、年份及相关变量后,黄河上、中、下游城市的回归系数均为负,表明数实融合可有效降低黄河流域城市碳排放强度,且下游城市群受影响最大,上、中游受影响较小。原因在于:下游因实体经济数字化需求迫切、数字基建与技术充足、政策市场驱动强,成为数实融合“主战场”;而上、中游城市资源与市场驱动力弱于下游,故受影响较小。

4.4.2　城市资源基础差异

由表 7 可知,数实融合对黄河流域不同类型城市群的碳排放影响差异显著。对资源成长型城市影响大,因其碳排放集中于具有数字化改造潜力的高碳产业与传统能源消耗体系;对资源衰退型城市与非资源型城市影响较大,资源衰退型城市因高碳产业萎缩导致数字技术改造效果不佳,非资源型城市碳排放源分散稀释了减排效益;对资源成熟型城市影响小,因其资源产业、能源消费已形成固化高碳模式,且生产效率冗余大幅缩减;对资源再生型城市回归系数不显著,因其产业重心已转向资源回收、绿色制造等领域,弱化了数实融合的影响。

表 6　区域异质性分析结果

变量	黄河上游	黄河中游	黄河下游
D	−0.392***	−0.441***	−3.658***
	(−3.282)	(−5.151)	(−3.188)
PS	−0.019	0.429***	−0.341
	(−0.351)	(4.276)	(−1.021)
GDP	0.607***	0.780***	−0.701
	(4.632)	(5.692)	(−1.350)
UL	1.271***	−1.618***	5.496***
	(3.071)	(−4.343)	(2.793)
FI	−0.102***	0.110***	−0.154
	(−4.944)	(3.551)	(−1.282)
EC	0.256***	0.351***	0.124
	(5.665)	(10.041)	(0.934)
常数项	1.881**	14.616***	−1.160
	(2.146)	(9.701)	(−0.272)
Control	Yes	Yes	Yes
city	Yes	Yes	Yes
year	Yes	Yes	Yes
样本数	240	190	33
F	87.693***	39.647***	4.631***
R^2	0.693	0.565	0.517

注:*、**、***分别表示在 10%、5%、1%水平上显著;括号内为 *t* 值。

表 7　资源基础异质性分析结果

变量	资源成长型城市	资源成熟型城市	资源衰退型城市	资源再生型城市	非资源型城市
D	−0.818***	−0.166*	−0.409**	−0.084	−0.414***
	(−6.282)	(−1.951)	(−2.580)	(−0.933)	(−5.793)
PS	−0.098	−0.171**	0.326***	0.495***	0.266***
	(−0.950)	(−2.272)	(5.881)	(9.901)	(9.000)
GDP	−0.644***	0.546***	−0.142	−0.291*	0.881***
	(−2.751)	(4.251)	(−0.491)	(−1.837)	(7.991)
UL	6.769***	−1.944***	1.351	1.297	0.019
	(5.151)	(−5.973)	(1.645)	(1.586)	(0.074)
FI	−0.138	0.124***	−0.176***	−0.221***	−0.038**
	(−1.642)	(3.310)	(−4.953)	(−3.872)	(−2.081)
EC	0.376***	0.101**	0.085	0.045	0.343***
	(6.161)	(2.580)	(1.291)	(1.112)	(11.749)
常数项	−8.515**	18.663***	12.963***	16.610***	5.312***
	(−2.200)	(18.711)	(6.581)	(4.901)	(7.203)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
city	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
year	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	90	120	90	60	390
F	38.347***	11.610***	23.247***	61.281***	113.747***
R^2	0.735	0.381	0.627	0.874	0.641

注:*、**、***分别表示在 10%、5%、1%水平上显著;括号内为 *t* 值。

5　机制分析

5.1　资源配置优化

表 8 第(1)列结果显示，能源效率系数显著为正，数实融合显著提高了能源利用效率。数实融合通过重塑能源生产、输配、消费全链条的运行逻辑，显著提升能源利用效率，进而加速城市碳减排。

5.2　技术创新

由表 8 第(2)列～第(4)列结果可知，数实融合显著促进了研发投入与产出，对研发投入的影响较显著。数实融合促进了企业的创新意愿，使得企业更愿意在创新发展投入更大的精力。此外，数实融合也促进了绿色技术创新，通过数字技术赋能与数据要素驱动，对绿色技术创新形成系统性助推效应，加速绿色技术成果的产业化与规模化应用。

表 8　数实融合对碳减排的机制分析结果

变量	资源配置优化		技术创新	
	(1)	(2)	(3)	(4)
	能源效率	研发产出	研发投入	绿色技术创新
D	0.041***	0.753***	1.148***	0.737***
	(3.932)	(6.721)	(7.981)	(5.801)
常数项	1.193***	9.544***	14.532***	7.316***
	(2.826)	(8.254)	(9.796)	(5.598)
Control	Yes	Yes	Yes	Yes
city	Yes	Yes	Yes	Yes
year	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	760	760	760	760
F	10.291***	9.215***	17.585***	10.923***
R^2	0.782	0.068	0.123	0.080

注：*、**、***表示在 10%、5%、1%水平上显著；括号内为 t 值。

6　拓展分析：政府绿色发展注意力的调节作用

为检验政府绿色发展注意力对数实融合降碳效应的调节作用，在基准回归基础上构建如下模型：

$$CO_{2it} = \beta_0 + \beta_1 D_{it} + \beta_2 Z_{it} + \theta_1 \text{Attention}_{it} \times D_{it} + \theta_1 \text{Attention}_{it} + \mu_t + \eta_i + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

式中：Attention 为地方政府绿色发展注意力，从政府工作报告中提取相关词汇(表 9)；θ_1 为政府绿色发展注意力对数实融合与碳排放强度关系的调节效应，其符号为负则表示政府绿色发展注意力的提升促进数实融合的碳减排效应。

由表 10 结果可知，政府绿色发展注意力显著提升了数实融合对黄河流域城市碳减排的作用。这也证明了上述政府绿色发展注意力影响碳排放的结论，地方政府绿色发展注意力的强度会显著影响数实融合的碳减排边际效应，增强数实融合对黄河流域城市碳减排的影响。

表 9　政府工作报告有关绿色发展注意力的词汇

目标	具体词汇
绿色发展	水耗、能耗、消耗、资源、节约、集约、能源、再利用、节能减排、节水灌溉、工业节水、降耗、新能源、高耗能清洁能源

表 10　政府绿色发展注意力的调节作用

变量	(1)	(2)
	CO_2	CO_2
D	−0.432***	−0.199***
	(−7.931)	(−2.703)
Attention	0.153***	0.206***
	(5.629)	(5.822)
常数项	8.884***	17.200***
	(15.084)	(397.520)
Control	Yes	No
city	Yes	Yes
year	Yes	Yes
样本数	750	750
F	147.057***	33.041***
R^2	0.581	0.081

注：*、**、***表示在 10%、5%、1%水平上显著；括号内为 t 值。

7　结论与建议

基于 2013—2022 年黄河流域 76 个地级市面板数据，构建双重固定效应模型，多维度实证分析了数实融合对碳减排的影响，得到以下研究结论。

(1)数实融合对黄河流域城市碳减排起促进作用，数实融合显著促进碳排放强度下降，对黄河流域城市发挥降碳作用。从具体作用机制来看，数实融合通过优化城市资源配置，提高能源利用效率从而达到降低碳排放效果。此外，数实融合促进企业创新意愿，有助于提升绿色技术创新水平，加速绿色成果转化，减少碳排放强度。

(2)从区域差异来看，数实融合的降碳效应在黄河下游城市表现出显著影响，在黄河上游和中游城市影响效果较显著。从城市资源禀赋来看，数实融合在资源成长型、资源衰退型和非资源城市层面显著促进碳排放强度减少，在资源成熟型城市层面促进碳减排效应较显著，而在资源再生型城市层面促进碳减排效应不显著。

(3)地方政府对绿色发展的关注显著增强了数实融合对黄河流域城市的降碳效应，政府对绿色发展的关注度越高，数实融合碳减排边际效益越强，数实融合对黄河流域城市碳减排效应越显著。

基于以上研究结论，提出如下几点政策建议。

(1)基于数实融合实现降碳的核心机制促进黄河流域产业绿色转型。企业在转型过程中动态调

整不同领域的资源分配,避免因资源错配产生额外碳排放;同时推动高耗能产业与数字技术深度结合,借助数字孪生等技术精准提高能源利用效率。此外,提高创新研发投入、培养创新技术人才、设立绿色创新专项,支持“数字+绿色”技术研发,同步建设绿色技术成果转化数字平台,加速技术落地应用,进一步强化数实融合的降碳效果。

(2)针对不同流域城市的资源禀赋与资源类型的差异性因地制宜地进行科学转型。黄河流域各地区资源禀赋情况各有差异,下游城市基础条件较好,应率先打造数实融合降碳标杆区,一方面推进高端产业数字化升级,另一方面建立对中上游的技术辐射机制;中上游城市需优先补齐数字基础设施短板,结合自身产业特色开发低成本适配方案。此外,针对不同资源类型的城市要根据实际情况进行科学转型。资源成长型需植入数字监管体系,资源衰退型重点推动产业转型,非资源型着力发展低碳产业集群,成熟型强化循环经济的数字化支撑;对于资源再生型城市,需开展适配性诊断,联合建设试点项目,破解当前降碳效应不显著的问题。

(3)放大政府对黄河流域绿色发展的关注度与降碳工作的协调效应。相关部门不但要深入了解数实融合对降碳的积极作用,还要通过政策引导企业开展数字化改造。有关部门可建立“政府-企业”降碳契约机制,激励企业进行绿色转型,并实时监测企业履约情况。同时,建设黄河流域数实融合降碳智慧监管平台,根据实际情况动态调整政策方向;开展政府绿色治理数字化能力培训,鼓励引入第三方服务,提升决策精准度,政府与企业共同发力进一步提高数实融合降碳的实际效益。

参考文献

[1] 张新生,刘驰,陈章政,等. 基于GTWR模型的黄河流域县域工业碳排放时空演变特征与影响因素[J/OL]. 环境科学,1-24[2025-10-02]. https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202504054.

[2] 李艳姗,刘红,朱为利. 数实融合赋能绿色发展:制造业数字化转型与绿色贸易[J]. 现代财经(天津财经大学学报),2025,45(7):22-39.

[3] 邝嫦娥,狄亚轩. 数实融合对城市发展方式绿色转型的影响[J]. 广东财经大学学报,2025,40(2):56-69.

[4] 张平淡,郝时雨,林琳. 数实融合对碳排放的影响及作用机制研究[J]. 求是学刊,2025,52(1):88-99.

[5] 程赛楠. 数字经济对碳排放强度的影响研究[D]. 太原:山西财经大学,2024.

[6] LIU B L,HUANG Y J,CHEN M M,et al. Towards sustainability:how does the digital-real integration affect regional green development efficiency? [J]. Economic Analysis and Policy,2024,83:42-59.

[7] 曹增栋,岳中刚. 数字经济与实体经济融合对碳排放强度的影响:理论模型与经验证据[J]. 经济问题探索,2024(12):1-16.

[8] 洪银兴,任保平. 数字经济与实体经济深度融合的内涵和途径[J]. 中国工业经济,2023(2):5-16.

[9] 徐妍,毕梦潇,柴映. 数实融合提升关键核心技术领域企业创新效率的研究:基于中国A股上市公司的数据检验[J/OL]. 科研管理,1-18[2025-10-02]. https://link.cnki.net/urlid/11.1567.G3.20241226.1147.002.

[10] 史丹,孙光林. 数据要素与新质生产力:基于企业全要素生产率视角[J]. 经济理论与经济管理,2024,44(4):12-30.

[11] 朱峻质. 数实深度融合逻辑与路径研究述评[J]. 现代经济探讨,2025(3):102-110.

[12] 谭蓉娟,周梓怡. 数字化背景下平台经济产业结构升级与实体经济发展[J]. 调研世界,2025(6):17-29.

[13] 温军,刁宇. 数实深度融合的数字产业集群创新发展路径:基于新结构经济学视角[J]. 吉首大学学报(社会科学版),2025,46(3):8-16,165.

[14] 王凯. 数实融合对减污降碳协同增效的影响:文献综述与展望[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版),2025,19(3):50-60.

[15] 朱俏俏,靳春丽,李征帛. 数实融合能否助推工业减污降碳协同增效?基于信息产业与工业的前后向关联考察[J]. 南方经济,2025(2):68-96.

[16] 赵放,徐熠. 以数实融合赋能中国式现代化的逻辑理路与路径选择[J]. 经济问题,2024(11):1-9.

[17] 穆昌进,许恒周. 数实融合对资源型城市绿色转型的影响:来自我国115个资源型城市的经验证据[J]. 城市问题,2025(2):33-44.

[18] 王浩,蒋金荷. 数实融合、资源配置与绿色转型绩效[J]. 北京工业大学学报(社会科学版),2025,25(5):89-107.

[19] 孙博文,杨霄斐. 竞争政策的减污降碳协同效应:基于《反垄断法》实施的准自然实验[J]. 数量经济技术经济研究,2025,42(2):172-194.

[20] 杨林燕. 数字经济与实体经济深度融合促进碳减排:理论机制与实证检验[J]. 吉林工商学院学报,2025,41(3):28-36.

[21] 苏坤荣. 数字经济与实体经济融合发展对碳排放的空间效应研究[D]. 呼和浩特:内蒙古财经大学,2024.

[22] 湛星星. “双碳目标”背景下省域碳排放空间关联网络特征及驱动因素研究[D]. 呼和浩特:内蒙古财经大学,2024.

[23] 项东,姜越,李楠. 高质量发展、绿色技术创新与碳排放:基于黄河国家战略的研究[J]. 中国环境管理,2025,17(3):14-26.

Impact of Integration of Digital and Real Economies on Carbon Emission Reduction in Cities of Yellow River Basin

WU Jiang, DONGFANG Sheqi

(School of Statistics and Data Science, Xi'an University of Finance and Economics, Xi'an 710100, China)

Abstract: Panel data of 76 prefecture-level cities in the Yellow River Basin from 2013 to 2022 is used , a dual fixed effects model was constructed to conduct. Empirical results show that the decline in carbon emission intensity and the reduction in carbon emission of cities in the Yellow River Basin are significantly promoted by the integration of digital and real economies. This conclusion remains valid after multiple robustness tests are conducted. Mechanism tests indicate that the reduction of carbon emissions in cities in the basin is significantly promoted by the integration of digital and real economies through the optimization of resource allocation and the improvement of technological innovation. Heterogeneity analysis reveals that the impact of the integration of digital and real economies on carbon emissions of cities in the Yellow River Basin is heterogeneous in terms of region and resource-based city type. In addition, the carbon reduction effect of the integration of digital and real economies on cities in the Yellow River Basin is effectively strengthened by the government's emphasis on green development.

Keywords: integration of digital and real economies; carbon emission reduction; dual fixed effects model; Yellow River Basin