黄河流域城市数字经济赋能碳排放效率的作用机制及空间效应

徐 伟，杨 琦，张 垚，王文鹏

（内蒙古科技大学土木工程学院，包头 014000）

摘要： 应用加速遗传算法的投影寻踪模型与含非期望产出的超效率SBM模型分别测算黄河流域城市数字经济水平与碳排放效率。通过构建多种模型实证检验黄河流域城市数字经济对碳排放效率的直接、间接影响效应与空间效应。研究表明：黄河流域内城市数字经济显著提高了碳排放效率，该结论通过五种稳健性检验后依然成立；技术创新、产业协同集聚及非常规水利用在数字经济影响黄河流域城市碳排放效率的过程中发挥间接作用；面对不同区位城市及不同资源类型城市，数字经济对碳排放效率的促进作用表现出异质性，具体表现为下游地区高于上游与中游地区，资源型城市高于非资源型城市；数字经济对碳排放效率具有积极的空间溢出效应。

关键词： 数字经济；碳排放效率；黄河流域；投影寻踪模型；超效率SBM；因果效应

中图分类号： F124；X321 **文献标志码：** A **文章编号：** 1671－1807(2026)10－0135－11

伴随“双碳”目标的提出，中国面临绿色转型的重要挑战。同时，继农业经济形态和工业经济形态之后，数字经济以新经济形态不断推动着中国高质量发展。根据《中国数字经济发展研究报告（2024年）》公布的数据可知，2023年中国数字经济规模达到53.9万亿元，较2022年增长3.7万亿元，且数字经济的增长速率已经连续10年高于同期GDP名义增速，其正逐渐成为拉动中国经济社会提质增效的强劲引擎[1]。《“十四五”数字经济发展规划》中总结出“数字经济是低能耗、低排放、低污染的绿色经济”，已有诸多研究在理论和实证研究方面证明了发展数字经济可以有效促进低碳发展，是助力中国实现“双碳”目标的重要手段[2-5]。黄河流域以其丰富的自然资源尤其是煤炭、石油等能源资源，在中国经济发展及生态安全等方面都具有重要的战略地位，改善黄河流域的碳排放效率对于“双碳”目标的实现具有重要意义。在此背景下，厘清黄河流域数字经济与碳排放效率二者内在联系对实现区域数字化和绿色低碳转型发展具有重要的理论价值与现实意义。

近年来，国内外学术界围绕数字经济与碳排放开展了大量实证研究，内容多以省际层面的数字经济对碳排放或者碳排放强度的影响效应为主。一是数字经济有助于降低碳排放量[6]。数字经济通过促进技术多样化以及能源利用效率提高最终实现降低碳排放量，数字经济还通过数字基础设施及数字技术的广泛应用打破物理障碍，使得资源分配更合理，促进产业结构升级实现降低碳排放强度[7]。数字经济自身的辐射效应有效减少信息不及时、不对称的情况，提高社会经济效率来减少碳排量[8-9]。二是数字经济对碳排放量的影响具有非线性特征，呈“倒U形”或“U形”趋势[10-11]。在数字经济的发展前期，由于数字基础设施的发展建设较快，电耗较高导致碳排放的增加，但等待数字基础设施的发展完善，数字技术的迅速应用可以帮助各区域通过模仿创新和自主创新来降低碳排放量，数字经济对碳排放的影响特征为倒U形[9]。也有研究发现，数字经济只有小于拐点时才能正向影响碳排放规模或碳排放效率，呈现U形的影响趋势，但在该研究期内中国各省份的数字经济水平还处在拐点左侧，

收稿日期： 2025-12-12

基金项目： 内蒙古自治区哲学社会科学规划（2024NDB107）

作者简介： 徐伟（1976—），女，内蒙古包头人，博士，教授，研究方向为低碳经济与城乡发展；杨琦（1999—），女，四川广安人，硕士研究生，研究方向为低碳经济与城乡发展；张垚（1990—），男，内蒙古呼和浩特人，博士，副教授，研究方向为能源经济管理，建筑节能与绿色建筑、复杂系统建模与优化；王文鹏（2000—），男，福建南平人，硕士研究生，研究方向为低碳经济与城乡发展。

发展数字经济仍是有必要的[10]。除了二者间的影响效应研究，学者还进行了影响路径以及空间效应的研究[12]。数字经济可以通过推动新质生产力、绿色创新水平提高来间接实现降低区域碳排放的目的。此外，数字经济通过赋能政府监管、激励社会参与公众环保及企业创新来作用于企业碳减排[13]。推行国家数字经济创新发展试验区政策使得国内经济社会产业结构向高级化和合理化转型，并且通过创新技术应用优化能源消费结构，最终实现节能减排[14]。

综上所述，目前学者从不同角度研究分析了数字经济与碳排放之间的关系，但仍有待深入研究。一是多从国家、省份、全国城市层面进行数字经济对碳排放、碳排放强度或特定领域碳排放的探讨，对特定地理区域尤其围绕黄河流域开展的研究尚显匮乏；二是研究视角不同，相较碳排放或碳排放强度，全要素碳排放效率综合衡量城市资源投入、碳排放与经济社会的耦合发展程度；三是研究方法的差异，目前关于数字经济水平测度主要采用熵权法、熵权-TOPSIS法、主成分分析法等，这些方法较少考虑指标数据间的非线性关系。此外，尽管数字经济与碳排放效率的关联性研究已受到一定关注，但空间维度的影响效应尚未被多数文献充分考量。鉴于此，本文从市级数据出发，尝试填补黄河流域省级数据层面数字经济与碳排放效率二者联系的研究空白，分别从区位及资源禀赋视角厘清城市数字经济对碳排放效率的影响作用的异质性特征；同时借助空间计量模型系统探讨黄河流域城市数字经济与碳排放效率之间的空间影响效应，丰富现有研究成果，为黄河流域区域发展有关政策提供新思路。

1 材料与研究方法

1.1 理论分析与研究假设

1.1.1 数字经济对碳排放效率发展的直接影响

以数字技术为核心的数字经济具有低能耗、低排放、低污染的特征，同时作为当前经济增长的新动能，正在改变生产、消费与治理方式，对提升碳排放效率具有促进作用[14]。从生产端看，数字技术与企业管理深度结合，可通过流程再造、精准调度和要素智能配置，提高生产效率与管理精细化水平，减少资源浪费和无效能耗，从而降低单位产出碳排放[16]。数字经济的发展还催生了线上教育、线上医疗、远程办公、电商平台等新业态，替代部分线下出行和交易环节，间接减少交通和服务活动中的能源消耗，并推动产业组织方式更加轻量化、服务化，有助于促进碳减排与产业结构优化协同推进[17-18]。从消费端来看，共享经济、平台经济和智能推荐的普及减少了产品囤积与供需错配，使绿色产品与节能信息更高效抵达用户，进一步引导居民绿色消费、推动低碳生活方式的扩散[19]。在分配和资源配置层面，数字化手段能够实现生产要素在时间和空间上的动态匹配，促使企业在政策与市场双重压力下加快绿色技术研发和设备更新，进而提高整体碳排放效率。

与此同时，黄河流域作为国家推动高质量发展与生态保护的关键区域，长期存在产业结构偏重、能源利用效率不高以及生态环境承载力紧张等制约因素，粗放能源利用与高碳锁定使区域碳排放效率提升面临现实约束。近年来，在国家数字中国、黄河流域生态保护和高质量发展等政策推动下，流域内城市加快数字基础设施建设与数字产业布局，数字经济为传统产业绿色化、智能化转型提供了技术基础。一方面，依托人工智能、区块链等技术构建的数字化能源管理系统，可以实现能源消耗的实时监测、优化配置与过程管控，促进节能减排、提高能源利用效率[20]；另一方面，数字技术嵌入生产全过程，有助于污染源精准识别、环境数据跨区域共享及生态治理协同推进，为破解流域内水资源约束、生态脆弱与高排放并存的难题提供了数据和制度支撑。据此，提出以下研究假设。

H1：黄河流域城市数字经济对碳排放效率的提升存在积极影响。

1.1.2 数字经济对碳排放效率发展的间接影响

数字经济的发展改变了传统的生产与管理方式，使信息与知识要素能够在更大范围内流动与共享，为技术创新提供了新的环境与条件。随着数据资源的积累以及计算能力的提升，企业相比以往能够更便捷地获取市场、技术与用户信息，从而在生产环节中更快发现问题、优化流程、改进工艺[21]。特别是在节能降耗、清洁能源和污染防治等领域，以数据驱动的创新方式不仅提升技术研发效率，还通过降低信息不对称性，降低了成果转化难度，推动了绿色低碳技术的扩散及应用[22]。在国家、地方政府的政策支持下，技术创新持续推进使得高耗能、高排放设备逐步被替代，能源结构向清洁化与高效化发展，推动碳排放效率提升。据此，提出以下研究假设。

H2：黄河流域城市数字经济通过促进技术创新发展提升碳排放效率。

此外,数字经济的持续深入发展为制造业与生产性服务业之间生产要素的跨部门、跨区域流动,搭建了更为高效的技术支撑载体。信息、资金与技术允许跨行业、跨区域实现快速匹配,通过数字平台、智能供应链与产业互联网,制造业各环节可以更紧密地与服务业联动,从而推动二者在空间和价值链上的协同集聚。提升“两业”协同集聚水平能够通过降低交易与协调成本、减少重复投入、促进绿色技术和数据的共享来改善资源要素的利用效率,从而提高单位产出的碳排放效率[23]。同时,制造业向“制造+服务”延伸,可将高附加值、低能耗的功能性环节嵌入原有体系,增强产业系统的减排能力[24]。据此,提出以下研究假设。

H3:黄河流域城市数字经济通过促进产业协同集聚发展改善碳排放效率。

数字孪生流域、智慧水务系统和物联网监测平台等新兴技术也因数字经济的深入发展开始在水资源管理领域广泛应用,通过实时数据采集、动态调度与精准决策,有效提升了污水处理、再生水利用和雨洪资源收集及调蓄等系统效率。人工智能算法可对流域水质变化、污染扩散趋势进行预测,为非常规水利用提供科学支撑;区块链和大数据技术促使水权确权与交易机制透明化,促进水资源在区域之间优化配置,形成数字化驱动的资源循环体系。在黄河流域这种水资源约束突出的地区,将再生水、雨洪水等非常规水源通过数字化手段实现就地回用,实质上可以替代一部分高能耗的跨流域调水和新增取水过程,从而在保持既定用水规模的前提下压配水链条的能耗与排放[25]。同时,数字平台对非常规水处理工艺的精细化控制、对污水-再生水-补水各环节的协同调度,有助于降低单位非常规水的处理能耗,使非常规水利用不再是简单的“以能换水”,而是转化为低碳化的水资源补给方式。这种基于数字技术的非常规水资源利用,不仅缓解了水资源短缺和环境污染的双重压力,还通过减少对高碳水源的依赖、降低污水末端处理负荷、提高水-能-碳的整体配置效率,表现为单位产出碳排放强度的下降,进而提升区域碳排放效率,从而为区域碳排放效率的持续提升提供新的实现路径[26]。基于此,提出以下研究假设。

H4:黄河流域城市数字经济通过提升非常规水利用水平发展提升碳排放效率。

1.1.3　数字经济对碳排放效率发展的空间影响

随着数字经济的快速发展,信息传播和资源配置呈现显著的“时空压缩”特征[27]。数字基础设施的完善和网络互连的深化,打破了城市间的地理壁垒,削弱了传统市场的空间分割,使得资本、技术、信息等生产要素能够在更大范围内自由流动,从而提升区域资源配置效率。一方面,因地理位置邻近的原因,相近城市之间在经济联系、产业分工和要素流动等方面的互动更为紧密,这种空间联系在数字经济的加持下进一步被强化了,区域经济表现出明显的趋同特征;另一方面,各地在制定和执行碳减排政策时往往具有模仿与学习效应,当一地在数字化驱动下推进绿色转型进程后,邻近地区往往会通过信息共享和经验借鉴推动自身低碳发展。数字经济的技术外溢效应也在这一过程中发挥了关键作用,数字平台的建设促进了创新成果和绿色技术在城市之间的扩散,加快了节能降碳技术的推广与应用。数字经济不仅改善了本地的碳排放效率,也通过空间溢出效应带动了周边区域碳排放效率的提升。基于此,提出以下研究假设。

H5:数字经济发展对城市邻近地区的碳排放效率具有空间溢出效应。

1.2　研究区概况

黄河流域在中国发展中具有重要的战略地位,其不仅是重要的能源富集区,还是重要的粮食产区,此外还是中国重要的制造业基地。黄河自西向东流经青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东共 9 个省份,最终汇入渤海。考虑数据的完整性及可获得性,避免数据缺失过多导致结果失真,选取黄河流域沿线 58 个地级市作为研究对象,如图 1 所示。

此外,2013 年是中国数字经济发展历程中的一个关键节点。首先是国务院于 2013 年 8 月颁布了《“宽带中国”战略及实施方案》及《关于促进信息消费扩大内需的若干意见》等。同年 12 月,工业和信息化部正式发放 4G 牌照,这标志着高速移动互联网时代开启。此外,支付宝也在 2013 年推出余额宝服务,拉开了中国互联网金融时代的序幕,是一次互联网金融知识的普及,还是“普惠金融”的开端。鉴于此,考虑数据的可获得性,研究期间为 2013—2022 年。

1.3　变量选取

1.3.1　被解释变量

碳排放效率期望以最小的要素投入与碳排放量收获最大的社会经济价值。参考田泽等[28]对碳排放效率的研究方法,基于含非期望产出的超效率



审图号:GS(2024)0650 号

图 1　研究区域

SBM(Super-slack based measure)模型测度碳排放效率(CE)。具体指标表征如表 1 所示,以人力、资本和能源为投入指标;地区生产总值作为期望产出指标,并且以 2013 年为基期做不变价处理;区域碳排放量作为非期望产出指标。其中,固定资本存量选用永续盘存法,按固定资产投资额的不变价格进行测算。

1.3.2　核心解释变量

基于数字经济内涵,考虑数据的可获得性,参考纪玉俊和尚嘉琳[29]、杨志才等[30]的做法,从数字产业化、产业数字化、数字基础设施和数字创新四个维度构建黄河流域城市数字经济(DIG)指标体系(表 2)。参考郭文强等[31]的方法,采用基于加速遗传算法的投影寻踪模型对数字经济水平进行测算。该方法可以克服普通投影寻踪模型仅能获得局部最优解而无法获得全局最优解的不足,保留普通投影寻踪模型的客观性强、抗干扰性高等优点,将非线性特征的高维数据有效转换为低维数据,通过投影指标函数得到最优投影值。

1.3.3　机制变量

基于前文分析,采用以下方法对机制变量进行量化表述。

(1)技术创新水平(Sti):以黄河流域某城市当年授权的绿色发明专利和绿色实用新型专利总件数除以该城市当年常住人口数的结果表征[32]。

(2)产业协同集聚(Coa):参考陈建军[33]的做

表 1　城市碳排放效率量化指标体系

类别	维度	具体指标	指标单位
碳排放效率	投入变量	单位从业人数	万人
		固定资本存量	百亿元
		能源消费量	百万吨标准煤
	期望产出	地区生产总值	百亿元
	非期望产出	二氧化碳排放量	百万吨

表 2　城市数字经济量化指标体系

系统层	准则层	指标层	单位	属性
数字经济	数字产业化	每万人信息传输、软件和信息技术服务业人数	人/万人	+
		邮电业务总量	万元	+
		信息传输、软件和信息技术服务业新注册企业数	家	+
	产业数字化	电子商务销售额	万元	+
		快递业务量	万件	+
		数字普惠金融		+
	数字基础设施	互联网覆盖率	户/百人	+
		移动电话普及率	部/百人	+
		移动基站数	个	+
	数字创新	在校大学生	万人	+
		每万人科学研究和技术服务业从业人员数	人/万人	+
		地方科技支出占财政支出	%	+

法，采用修正的 *E-G* 指数测度各城市产业协同集聚水平，测算公式为

$$Q_{uz}=\frac{y_{uz}/G_z}{y_z/G} \tag{1}$$

$$Q_{uf}=\frac{y_{uf}/G_f}{y_f/G} \tag{2}$$

$$Coa_u=1-\frac{|Q_{uz}-Q_{uf}|}{Q_{uz}+Q_{uf}}+(Q_{uz}+Q_{uf}) \tag{3}$$

式中：Coa_u 为城市 u 制造业与生产性服务业产业协同集聚水平；Q_{uz}、Q_{uf}分别为城市 u 制造业和生产性服务业的区位熵指数；y_{uz}、y_{uf}分别为城市 u 在制造业和生产性服务业的从业人员数；G 为全国从业人员数；G_z、G_f 分别为全国制造业和生产性服务业的从业人员数；y_z、y_f 分别为全国制造业和生产性服务业从业人员数。考虑数据的可获得性，计算时采用分行业的年末单位从业人员数表征从业人员数量。

(3)非常规水利用水平(U_w)：采用城市当年再生水利用量除以城市供水总量表征。

1.3.4　控制变量

为减少遗漏变量对回归统计结果的干扰，参考现有研究选取以下可能影响碳排放效率的控制变量：金融发展水平(Eco)，用年末金融机构贷款余额与地区生产总值的比值衡量；经济发展水平(Pgdp)，用人均地区生产总值表征；人口密度(Pop)，用年末常住人口与行政区域面积的比值衡量；基础设施水平(Frei)，用公路货运总量表征；社会消费水平(Cons)，用社会消费品零售总额与地区生产总值的比值衡量。

以上地区生产总值均以 2013 年为基期做不变价处理。

1.4　数据说明

考虑数据的可获得性，选取 2013—2022 年黄河流域 58 个地级及以上城市进行统计分析。所用数据主要来源于 2013—2023 年的《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》、各省市统计年鉴和统计公报、EPS 数据库、Wind 数据库、北京大学数字金融中心及中国研究数据服务平台(CNRDS)。碳排放数据来自全球二氧化碳排放数据库(ODIAC)。其中，少量缺失数据采用线性插值法进行补充完善。同时对研究数据采用方差膨胀因子法对各变量进行多重共线性分析，VIF 均小于 10，基于结果判断变量间不存在严重的多重共线性情况。

1.5　模型构建

1.5.1　基于加速遗传算法的投影寻踪模型

(1)指标归一化。

正向指标：

$$X(u,v)_t=\frac{x(u,v)_t-x_{\min}(v)}{x_{\max}(v)-x_{\min}(v)} \tag{4}$$

负向指标：

$$X(u,v)_t=\frac{x_{\max}(v)-x(u,v)_t}{x_{\max}(v)-x_{\min}(v)} \tag{5}$$

式中：$x(u,v)$为第 t 年 u 城市在第 v 个指标的指标值；$x_{\max}(v)$、$x_{\min}(v)$为第 v 个指标的指标值中的最大值和最小值。

(2)数字经济投影值函数 $h(u)$。

$$h(u)=\sum_{v=1}^{n}a(v)X(u,v)_t \tag{6}$$

式中：$\{a(v)|v=1,2,\cdots,n\}$为投影方向；$h(u)$为一维投影值。

(3)构建投影指标函数 $H(u)$。

$$H(u)=S_cP_c \tag{7}$$

式中：S_c 为 $h(u)$的标准差；P_c 为 $h(u)$的局部密度。

$$S_c=\sqrt{\frac{\sum_{u=1}^{z}[h(u)-E_c]^2}{n-1}} \tag{8}$$

$$P_c=\sum_{i=1}^{z}\sum_{j=1}^{z}[R-r(i,j)]f[R-r(i,j)] \tag{9}$$

$$r(i,j)=|h(i)-h(j)| \tag{10}$$

式中：E_c 为 $h(u)$的平均值；R 为局部密度的窗口半径；$r(i,j)$为第 i 个城市与第 j 个城市间的数字经济指数在投影值 $h(u)$上的差异距离；$f(t)$为单位阶跃函数。$T\geqslant 0$ 时，其值为 1，否则为 0。

(4)优化投影指标函数。

$$\max H(u)=S_cP_c \tag{11}$$

$$\text{s.t.}\sum_{v=1}^{n}a^2(v)=1 \tag{12}$$

在式(9)的约束条件下寻找最优投影方向，得到值即为权重值，重新代入式(6)得到数字经济指数值。

1.5.2　基准模型

为明确黄河流域城市数字经济与碳排放效率的内在关联，构建基准回归模型检验黄河流域城市数字经济对碳排放效率的影响效应，同时对个体及时间进行控制以减少异质性。

$$CE_{it}=\alpha_0+\alpha_1 DIG_{it}+\sum_{k=2}^{6}\alpha_k\,Control_{it}+\mu_i+\delta_t+\varepsilon_{it} \tag{13}$$

式中：i 为城市个体；t 为年份；CE_{it}为碳排放效率；DIG_{it}为数字经济；$Control_{it}$为各控制变量；α_0 为截

距项；α_1 为数字经济变量的回归系数；α_k 为各控制变量的回归系数；μ_i 为城市个体固定效应；δ_t 为年份固定效应；ε_{it} 为随机误差项。

1.5.3　中介效应模型

参考江艇[34]的做法，构建中介效应模型以检验机制变量是否存在间接作用。

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \mathrm{DIG}_{it} + \sum_{k=2}^{6} \beta_k \mathrm{Control}_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (14)$$

式中：β_0 为截距项；M_{it} 为机制变量；μ_i 为城市个体固定效应；δ_t 为年份固定效应。

1.5.4　空间面板回归模型

构建空间面板回归模型进一步识别黄河流域城市数字经济对碳排放效率的空间溢出效应。首先，数字经济通过全局莫兰指数显示存在空间自相关性。其次，通过 LM 检验，结果显示适用空间误差模型，但 LR 检验及 Wald 检验显示空间杜宾模型拒绝退化为空间误差模型或空间滞后模型，面对三种检验所得出的不同结果，应选择空间杜宾模型更为合适[35]，因此构建空间杜宾模型进行空间溢出效应的检验。

$$\mathrm{CE}_{it} = \theta_0 + \theta_1 \mathrm{WCE}_{it} + \theta_2 \mathrm{WDIG}_{it} + \theta_3 \mathrm{DIG}_{it} + \sum_{k=1}^{5} \rho_k W\ \mathrm{Control}_{it} + \sum_{k=1}^{5} \varphi_k W\ \mathrm{Control}_{it} + \mu_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (15)$$

式中：θ_0 为截距项；θ_i 为相关系数；W 为经济地理矩阵空间权重矩阵变量。

2　结果与分析

2.1　基准回归结果

表 3 列出了黄河流域城市数字经济对碳排放效率的基准回归结果。其中，列(1)的基准回归模型中未纳入控制变量，也未进行城市、年份固定效应。数字经济的系数为0.189 1，在 1%的水平上显著为正。此结果初步说明数字经济对碳排放效率存在促进作用。列(2)～列(6)汇报了逐步加入控制变量，并控制城市与年份固定效应的基准回归结果。在控制一系列协变量及城市与时间固定效应后，数字经济仍然显著地促进碳排放效率的提升，并且影响系数从0.189 1提升至0.510 9，H1 成立。就控制变量的影响而言，金融发展对碳排放效率的影响效应显著为正，其可以为城市的产业结构优化及绿色转型提供金融支持进而促进碳排放效率提升，这与 Du 等[36]的研究结果吻合；经济发展在 5%的水平上对碳排放效率存在正向推动作用，经济发展水平较高的地区更容易吸引人才，引进低碳技术等，转而投资低碳产业，助推传统产业进行绿色转型，这与龚银银等[37]的研究结论相吻合；人口密度对碳排放效率的影响系数为0.128 5，通过了 1%的显著性水平检验。人口密集区有助于共享经济发展进而促进碳排放效率，同时利于低碳技术快速应用，摊薄绿色转型成本，这与白雄等[38]的研究结论相吻合；基础设施水平对碳排放效率的影响效应为负，在 10%的水平上显著，原因可能是中国交通运输快速发展但因其带来的经济效应具有滞后性，高速公路

表 3　基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
DIG	0.189 1***	0.495 2***	0.508 8***	0.521 4***	0.510 1***	0.510 9***
	(7.01)	(10.63)	(10.83)	(11.46)	(10.74)	(10.72)
Eco		0.183 9***	0.304 5***	0.297 0***	0.302 5***	0.296 0***
		(2.85)	(3.53)	(3.45)	(3.61)	(3.52)
Pgdp			0.324 4*	0.351 9**	0.385 3**	0.390 0**
			(1.84)	(1.99)	(2.29)	(2.30)
Pop				0.129 5***	0.130 3***	0.128 5***
				(3.22)	(3.26)	(3.15)
Frei					−0.089 4*	−0.092 2*
					(−1.86)	(−1.91)
Cons						0.017 9
						(0.48)
常数项	0.473 6***	0.303 4***	0.200 4***	0.152 3**	0.168 5**	0.161 6**
	(32.18)	(10.31)	(3.32)	(2.40)	(2.59)	(2.38)
城市固定	NO	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定	NO	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	580	580	580	580	580	580
R^2	0.049 8	0.896 3	0.898 3	0.900 5	0.901 0	0.900 8

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

网扩张同时也巩固了公路货运的主导地位，从而出现高碳锁定现象；而社会消费水平未对碳排放效率表现影响作用，可能是受其他变量的交互影响导致的影响作用不显著。

2.2　稳健性及内生性检验

基准回归结果的稳健性与可靠性是支撑研究结论的关键前提。为排除模型设定、变量测量等因素可能存在的干扰，同时缓解核心变量间可能存在的内生性问题，通过以下方法进行验证：更换数字经济测度方法，采用常见熵值法替换投影寻踪模型重新赋权并测算，结果如表4列(1)所示；考虑到城市之间在经济规模、产业结构和数字化基础上存在明显差异，误差项可能存在组内相关和异方差性，在固定效应模型的基础上采用按城市聚类的稳健标准误进行估计，结果如表4列(2)所示；受新冠疫情的影响，剔除202—2022年的数据进行基准回归，结果如表4列(3)所示；缩尾处理，异常值的存在可能导致结果出现系数偏误，结果如表4列(4)所示；通过对数字经济及控制变量采取滞后一期处理再进行基准回归，结果如表4列(5)所示。此外，参考王淑贺等[39]、吴思栩和李杰伟[40]的做法，采用各城市到“八纵八横”光缆网络骨干城市的距离的倒数作为数字经济的工具变量(IV)，通过工具变量法进行回归，结果如表4列(6)和列(7)所示。由表4可知，各模型下DIG的回归系数依然是显著为正的，与基准回归模型结果一致，证实了数字经济对碳排放效率促进作用具有稳健性。

2.3　异质性分析

黄河流域作为中国重要的能源基地，各城市在资源类型定位上存在不同，同时还可能由于城市所在流域区位不同，数字经济对其碳排放效率的影响存在不同。为此，从流域区位和资源禀赋两个维度进行异质性检验。

(1)区位异质性。参考田磊等[41]的做法，对黄河流域上中下游城市的划分标准进行研究区域上中下游的划分。同时，为保持样本完整性并兼顾区域差异，参考肖挺和叶浩[42]的做法，在统一的回归框架下，以上游区域作为参照组，引入2个地理分组虚拟变量(Mid和Low)。中游区域(Mid)所包含的城市虚拟变量为1，中游城市以外的城市值为0。相同地，下游区域(Low)所包含的城市在虚拟变量为1，下游城市以外的城市值为0。将数字经济DIG分别与中游区域(Mid)和下游区域(Low)交互形成交互项以构建模型。

表5列(1)展示模型回归的结果，数字经济对不同区位城市的碳排放效率均产生了显著的积极影响。以上游地区为参照组，数字经济的回归系数为0.276，在1%的显著性水平下为正。该结果表明上游城市的数字经济发展对碳排放效率具有显著促进作用。中游地区的交互项系数为0.070，未通过显著性检验，此结果说明中游与上游之间在数字经济影响强度上差异不大。下游地区的交互项系数为0.262，并在1%的水平下显著为正，表明下游城市数字经济的促进效应明显强于上游地区和中游地区。

表4　稳健性及内生性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	替换测度方法	聚类稳健标准误	剔除特殊年份	缩尾处理	滞后一期	First	Second
DI	1.305***						
	(0.141)						
DIG		0.467***	0.371***	0.478***			0.560***
		(0.058)	(0.053)	(0.049)			(0.064)
L.DIG					0.413***		
					(0.067)		
IV						0.002***	
						(0.000)	
控制变量	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
常数项	0.346***	0.251***	0.403***	0.260***	0.374***	0.325***	0.335***
	(0.056)	(0.056)	(0.056)	(0.057)	(0.068)	(0.027)	(0.057)
观测值	580	580	406	580	522	580	580
R^2	0.898	0.899	0.940	0.897	0.894		
不可识别检验						20.101{0.000}	
弱工具变量检验						471.235[16.38]	
城市固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著；除了列(2)的( )内为聚类稳健标准误，其他( )内为稳健标准误；{ }内为不可识别鲍华树应的P值；[ ]内为弱工具变量检验的临界值。

(2)资源禀赋异质性。参考《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》中资源型城市名单,将研究区域城市分为资源型城市和非资源型城市两组。同样地,以非资源型城市做参照组,引入虚拟变量资源型城市(ZY)构建交互项构建模型以识别不同资源禀赋条件下数字经济影响效应的差异。

表5列(2)展示了模型回归结果,数字经济DIG的回归系数为0.445,在1%的显著性水平下为正。结果说明非资源型城市数字经济对碳排放效率的改善存在积极作用。交互项DIG×ZY的系数为0.184,在5%的水平下显著,表明数字经济在资源型城市中的促进作用相对于非资源型城市更强。这表明尽管资源型城市传统上以高能耗产业为主,但数字化转型已经在这些地区显现出明显的减排效应。数字经济在资源型城市中不仅未受产业结构"锁定效应"的限制,反而通过推动能源数字化、促进生产流程智能化和加强碳排放治理,实现了对碳排放效率的更强促进作用。数字化转型已成为资源型地区实现产业升级和绿色转型的重要动力,同时也验证了数字经济在不同资源禀赋背景下的适应性与包容性。

2.4　机制检验

表6列(1)显示数字经济的回归系数为0.028,通过了1%的显著性水平检验,表明数字经济可以显著促进黄河流域城市技术创新水平提升。数字经济通过提升数据采集、传输与处理能力,降低信息搜寻与试错成本,促进研发活动与工艺优化在企业内部和行业内扩散。在生产活动过程中,于高耗能环节嵌入数字化监测及过程控制后,生产的可视化与可控性提高,预测性维护与在线优化减少设备故障与物耗浪费,单位工业增加值能耗和单位产值碳排放随之下降,带动碳排放效率提升。H2成立。

表5　异质性分析结果

变量	(1)	(2)
	CE	CE
DIG	0.276***	0.445***
	(0.093)	(0.046)
DIG×Mid	0.070	
	(0.096)	
DIG×Low	0.262***	
	(0.087)	
DIG×ZY		0.184**
		(0.076)
控制变量	YES	YES
常数项	0.317***	0.241***
	(0.070)	(0.060)
观测值	580	580
R^2	0.902	0.901
城市固定	YES	YES
年份固定	YES	YES

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著;括号内为稳健标准误。

表6　机制检验

变量	(1)	(2)	(3)
	Sti	Coa	Uw
DIG	0.028***	0.210*	0.245***
	(0.003)	(0.114)	(0.089)
控制变量	YES	YES	YES
常数项	−0.004**	2.227***	−0.122
	(0.002)	(0.107)	(0.086)
观测值	580	580	580
R^2	0.894	0.929	0.644
城市固定	YES	YES	YES
年份固定	YES	YES	YES

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著;括号内为稳健标准误。

表6列(2)显示数字经济的回归系数为0.210,通过了10%的显著性水平检验,表明数字经济可以显著促进黄河流域城市产业协同集聚水平提升。数字平台与网络化协作降低交易与匹配成本,强化上下游间的信息联通与工艺协同,推动专业分工进一步深化及公共治理设施的共享,进而减少重复建设和分散治理造成的效率损失。供应链协同与标准化有助于缩短周转、降低库存和运输中的无效能耗,还可以通过园区层面的集中治污、余热互供等机制提高资源循环利用水平,从而在现有技术条件下提升碳排放效率。H3成立。

表6列(3)显示数字经济的回归系数为0.245,通过了1%的显著性水平检验,表明数字经济可以显著促进黄河流域城市非常规水利用水平提升。在黄河流域"水-能-碳"耦合约束显著的背景下,数字化监测、调度与质量控制提高再生水、雨洪资源等非常规水的可得性与可用性,扩大其在冷却、清洗及市政杂用等场景的替代比例,降低取供水、输配和终端处理的单位能耗与隐含碳排放。同时,漏损管控与运行优化减少无效抽取与泵送,改善能源使用效率与碳排放效率。H4成立。

2.5　空间溢出效应

通过LR检验、LM及Wald检验、豪斯曼检验,结果显示含有双固定效应的空间杜宾模型为最优模型。基于经济地理矩阵构建空间杜宾模型,回归结果如表7所示。列(1)和列(2)分别表示数字经济的本地空间效应及邻地空间效应,列(3)～列(5)结果

表 7　空间杜宾模型回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	本地空间效应	邻地空间效应	直接效应	间接效应	总效应
DIG	0.430***	0.227***	0.441***	0.341***	0.782***
	(0.045)	(0.085)	(0.046)	(0.088)	(0.089)
Eco	0.250***	−0.074 4	0.255***	−0.0324	0.222
	(0.073)	(0.191)	(0.069)	(0.214)	(0.215)
Pgdp	0.367***	−0.0771	0.363***	−0.0338	0.329
	(0.094)	(0.277)	(0.088)	(0.304)	(0.299)
Pop	0.125***	0.266***	0.133***	0.334***	0.467***
	(0.034)	(0.092)	(0.033)	(0.106)	(0.116)
Frei	−0.094**	0.026	−0.092**	0.006 3	−0.086
	(0.045)	(0.125)	(0.0444)	(0.139)	(0.151)
常数项	0.025 3	0.190**	0.033	0.233**	0.266**
	(0.036)	(0.084)	(0.037)	(0.108)	(0.123)
rho	0.163**	0.163**	0.163**	0.163**	0.163**
	(0.067)	(0.067)	(0.067)	(0.067)	(0.067)
观测值	580	580	580	580	580
R^2	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032

注:***、**、* 分别表示在 1%、5%、10%的水平上显著;括号内为稳健标准误。

显示空间分解效应。数字经济对本地和邻地的碳排放效率的空间效应均显著为正,均通过了 1%的显著性水平检验。此外,空间效应分解结果显示间接影响的影响系数为 0.341,说明本地数字经济的提升可以对周边城市的碳排放效率产生促进作用。可能由于数字经济本身拥有特征促成的。因无视地理层面的物理壁垒,其渗透性、覆盖性大大增强,知识、经验、技术等允许转化为数据要素流动到邻近城市,并通过将传统生产要素与数据要素连接,重构传统管理局面,助推新动能上岗,促进产业绿色转型及产业结构升级,最终实现碳排放效率提升。H5 成立。

3　讨论

本文立足市级尺度,从整体与空间视角系统考查数字经济赋能黄河流域城市碳排放效率的作用机理及空间效应,旨在对现有以黄河流域省级尺度或全国尺度为主的研究形成有益补充。与现有研究相比,该研究具有一定的拓展意义。从研究视角与研究内容看,相较单纯关注碳排放量或碳排放强度,围绕全要素碳排放效率这一综合性指标展开分析有助于刻画城市在资源投入、经济产出与环境约束之间的协同关系。在此基础上,结合黄河流域城市在区位条件与资源禀赋方面的差异,进一步检验了数字经济影响碳排放效率的异质性特征,并通过空间计量模型识别其空间溢出效应,在一定程度上回应了现有研究对空间维度关注不足的问题。与此同时,在研究设计与实证分析方面仍存在可进一步拓展的空间:首先,技术创新在质量结构与成果转化方面具有显著差异,不同类型的创新活动对低碳转型的作用效果也可能存在分化,因此未来研究可在数据条件进一步完善,对技术创新作用机制进行更为细致的拓展分析。其次,黄河流域内部城市在资源禀赋、发展阶段与数字化基础等方面存在显著差异,数字经济对碳排放效率的影响强度及其作用路径可能呈现更为复杂的空间异质性特征。未来研究可进一步结合地理加权回归或时空地理加权回归等方法,从局部视角深入分析数字经济影响效应的空间差异及其驱动因素。

4　结论

(1)黄河流域城市数字经济对碳排放效率具有显著的促进作用,且基准回归结果在经过稳健性检验及内生性检验后依然保持稳健可靠,未发生实质性改变。

(2)黄河流域数字经济对碳排放效率的影响具有地理区位及资源禀赋异质性。其中,不同区位的数字经济对碳排放效率的促进作用大小表现为下游城市最佳,中游城市次之,上游城市最后。对于不同资源类型城市的促进作用大小表现为资源型城市高于非资源型城市。

(3)黄河流域数字经济对城市技术创新、产业协同集聚、非常规水利用具有显著促进作用,间接实现碳排放效率的提升。

(4)数字经济对碳排放效率具有显著的正向空间溢出效应,即本地数字经济提升可以促进邻市的碳排放效率提升。

5　建议

(1)鼓励黄河流域各城市发展数字经济,实现数字经济与碳排放效率双提升。发挥好“头雁效应”及政府投资的带动放大效应,建设数字基础设施打通数据要素传输通道,加强区域间数字基础设施联通,弥补区域间数字鸿沟,发挥好高质量发展的数字基石作用。此外,拓宽数字应用面,可通过建立跨部门、跨区域的碳排放数据共享平台以统一核算标准,消除“数据孤岛”效应,为管理决策提供数据基础。

(2)完善技术创新相关政策,支持跨地区城市构建数字创新平台,鼓励交叉学科融合创新。对于取得创新成果的企业或个人发放补贴和奖励,以激发创新动力。其次是精准投资以加快技术成果转化,对应用减碳、低碳技术的企业予以财政补贴支

持，鼓励行业协会牵头建立技术共享圈，积极推动行业向智能、低碳转型。结合城市定位及地区发展需求制定针对人才的技能培训、补贴政策，吸引创新人才向数智低碳型产业园区汇集。

(3)以产业协同集聚为抓手，建设企业间协同使用的数据与供应链平台，推动研发设计、检测认证、物流与金融等生产性服务嵌入制造全流程，减少错配与重复环节，缩短周转时间。园区还可以发展集中治污、余热梯级利用、共享仓储与公共检测等平台，提高资源循环与设备利用率，降低单位产值能耗与运输强度。此外，推动关键零部件和工艺参数的标准化、模块化，促进专业化分工和跨企业协作，加快绿色工艺扩散。

(4)系统推进非常规水利用发展，聚焦投入研发与示范应用。通过建设智能雨水收集与数字化污水处理设施，配套涉及水量水质的在线监测与调度平台，扩大再生水在工业冷却、清洗与市政杂用中的替代。完善财政补贴与绿色金融，吸引企业与社会资本参与，并将单位电耗、减排量等绩效指标纳入考核。通过数字化精细调配、漏损管控与需水侧管理，降低供排水链条能耗与隐含碳，实现经济、环境与生态效益协同。

(5)对于不同区位及资源禀赋城市因地制宜制定政策。数字基础设施是数字技术应用的基石，也是推动产业数字化转型的关键。对于产业结构偏重的黄河上、中游城市而言，首先完善数字基础设施建设。依托该区域光伏新能源产业的发展优势，引入数字技术构建智能电网，以提升光伏发电与电力系统的高效匹配水平。鼓励数字基础设施、可再生能源与储能技术的协同创新，从而进一步释放数字经济在改善黄河流域碳排放效率方面的潜力。其次，推动高碳排重点企业实行标识解析、区块链等数字技术优化工艺流程，同时配套节碳指标交易，通过阶梯式返税激发高碳排重点企业转型动力，最终实现优化技术规模化落地。流域下游城市因产业结构多元以及区位、经济等方面优势，减排技术已相对成熟，在政策制定方面有针对性地突破结构性碳减排瓶颈。依靠地理优势，利用低空经济的数字经济属性，建设低空经济产业园区，通过数字调度降耗、清洁能源替代传统能源实现降碳及经济增长。鼓励农业发达城市引进智能农田管理系统，通过精准灌溉、变量施肥等实现节水节能，实现碳排放效率提升。

(6)建立各区域制定相关政策时，各区域的数字产业战略布局应具有差异化，利用数据治理制度规则及数字基础设施的“软硬联通”，使资源要素在地区间得到合理且有效配置，推动地区间的数字经济项目落地，实现产业联动，数实融合，最终实现合作双赢。此外，鼓励建立“黄河流域一体化大数据中心”，促进跨区域的知识溢出和技术扩散。

参考文献

[1] 汪晓文，陈明月，陈南旭. 数字经济、绿色技术创新与产业结构升级[J]. 经济问题，2023(1)：19-28.

[2] 周小刚，郭玉环，金柳君，等. 江西省数字经济发展促进碳减排的机理与对策研究[J]. 东华理工大学学报(社会科学版)，2023，42(6)：529-537.

[3] 范丹雪，李美玥. 数字经济驱动下我国绿色低碳转型的实现路径[J]. 环境科学，2026，47(4)：2227-2241.

[4] 张自然，海梅红. 数实融合促进绿色全要素生产率提升研究[J]. 经济纵横，2025(3)：54-65.

[5] ZHANG W，LIU X，WANG D，et al. Digital economy and carbon emission performance：evidence at China's city level[J]. Energy Policy，2022，165：112927.

[6] 吴昌南，田凌峰. 数字经济、碳全要素生产率与城市低碳发展[J]. 当代财经，2024(9)：111-125.

[7] 杨刚强，王海森，范恒山，等. 数字经济的碳减排效应：理论分析与经验证据[J]. 中国工业经济，2023(5)：80-98.

[8] CHANG H，DING Q，ZHAO W，et al. The digital economy，industrial structure upgrading and carbon emission intensity：empirical evidence from China's provinces[J]. Energy Strategy Reviews，2023，50：101218.

[9] 刘潭，徐璋勇. 数字经济、异质性技术创新与二氧化碳排放[J]. 科技进步与对策，2023，40(13)：1-10.

[10] ZHANG Z，CHEN L，LI J，et al. Digital economy development and carbon emission intensity：mechanisms and evidence from 72 countries[J]. Scientific Reports，2024，14(1)：28459.

[11] 王香艳，李金叶. 数字经济是否有效促进了节能和碳减排？[J]. 中国人口·资源与环境，2022，32(11)：83-95.

[12] 曹金华，周小勇，章玲. 数字经济发展对区域碳强度的影响——基于新质生产力和绿色创新中介效应的视角[J]. 技术经济与管理研究，2025(4)：7-14.

[13] 王艳林，金鑫，盛钰寒. 数字经济赋能企业碳减排：绩效与作用机制[J]. 会计之友，2025(3)：81-90.

[14] 段冶，钟娟娟，孙才志. 数字经济对沿海地区能源碳排放影响与作用机制[J]. 环境科学，2025，46(9)：5454-5464.

[15] 寇佳丽，徐晓光. 数字经济的节能减排效应研究——基于能耗双控与减污降碳视角[J]. 产业经济研究，2025(2)：15-28.

[16] 彭文斌，苏欣怡. 长三角地区数字经济发展对碳排放效率的影响——基于产业集聚的门槛效应[J]. 当代财经，2024(12)：126-139.

[17] 王俊，杨林燕. 数字经济、绿色技术创新与区域碳减排[J]. 湖南科技大学学报(社会科学版)，2025，28(2)：

122-132.
[18] 李彦，章紫微，林晓燕. 数字基础设施对中国经济双循环发展的影响[J]. 统计与决策，2024，40(13)：102-107.
[19] 高维龙. 数字经济对城市减污降碳的协同效应及空间机制[J]. 华东经济管理，2025，39(3)：70-82.
[20] ZHOU Y，LIU J . Advances in emerging digital technologies for energy efficiency and energy integration in smart cities[J]. Energy and Buildings，2024，315：43.
[21] 廖文龙，董新凯，翁鸣，等. 市场型环境规制的经济效应：碳排放交易、绿色创新与绿色经济增长[J]. 中国软科学，2020(6)：159-173.
[22] 徐英启，程钰，王晶晶. 中国资源型城市碳排放效率时空演变与绿色技术创新影响[J]. 地理研究，2023，42(3)：878-894.
[23] 韩峰，谢锐. 生产性服务业集聚降低碳排放了吗？——对我国地级及以上城市面板数据的空间计量分析[J]. 数量经济技术经济研究，2017，34(3)：40-58.
[24] 宋晓玲，李金叶. 产业协同集聚、制度环境与工业绿色创新效率[J]. 科技进步与对策，2023，40(4)：56-65.
[25] 王建华，朱永楠，李玲慧，等. 社会水循环系统水-能-碳纽带关系及低碳调控策略研究[J]. 中国工程科学，2023，25(4)：191-201.
[26] 杨佩卿，尹亚欣. 新发展理念下数字经济对黄河流域碳排放的影响[J]. 西安交通大学学报(社会科学版)，2025，45(5)：139-151.
[27] 宋小语，赵林，张春霆，等. 数字经济对中国生态福利绩效的空间溢出效应研究[J]. 地域研究与开发，2025，44(1)：158-165.
[28] 田泽，徐兴武，张瀚亓，等. 创新要素错配对碳排放效率的影响——基于空间溢出效应视角的研究[J]. 科技管理研究，2024，44(14)：205-213.
[29] 纪玉俊，尚嘉琳. 数字经济影响下的产业协同集聚：红利抑或陷阱？[J]. 北京理工大学学报(社会科学版)，2025，27(3)：130-152.
[30] 杨志才，侯庆庆，宗雨濛. 数字经济与共同富裕的耦合协调机制与效应研究[J]. 创新科技，2024，24(6)：20-40.
[31] 郭文强，韦星羽，雷明. “双碳”目标下数字技术赋能农业碳生产率的影响[J]. 环境科学，2026，47(3)：1486-1497.
[32] 向云，薛景，万佳雨. 数字经济赋能农业产业结构升级：影响效应与作用机制[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2025，33(10)：2056-2069.
[33] 陈建军，刘月，邹苗苗. 产业协同集聚下的城市生产效率增进——基于融合创新与发展动力转换背景[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版)，2016，46(3)：150-163.
[34] 江艇. 因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J]. 中国工业经济，2022，40(5)：100-120.
[35] 曾浩 . 1997—2013 年中国省域创新差异演化及影响因素分析——基于空间杜宾模型的实证研究[J]. 科技管理研究，2016，36(2)：14-20.
[36] DU M，ZHANG J，HOU X. Decarbonization like China：how does green finance reform and innovation enhance carbon emission efficiency? [J]. Journal of Environmental Management，2025，376：124331.
[37] 龚银银，张永庆，罗婷. 长三角城市群碳排放效率与经济高质量发展耦合协调研究[J]. 长江流域资源与环境，2025，34(2)：295-308.
[38] 白雄，韩锦绵，张文瑞. 数字经济发展赋能绿色经济增长：后发优势与隧道效应[J]. 统计与决策，2024，40(1)：23-28.
[39] 王淑贺，刘世哲，李晓敏. 数字经济空间关联网络对减污降碳的影响机制研究[J]. 中国地质大学学报(社会科学版)，2025，25(2)：105-119.
[40] 吴思栩，李杰伟. “数字经济”时代城市的未来——互联网对中国城市生产性服务业集聚的影响研究[J]. 经济学(季刊)，2024，24(2)：431-447.
[41] 田磊，刘亚彤，尹雨，等. 旅游产业集聚对旅游生态效率的影响——基于黄河流域 90 个城市的实证分析[J]. 干旱区资源与环境，2025，39(6)：197-208.
[42] 肖挺，叶浩. 火车外贸能拉来真金白银吗——中欧班列吸引外资能力的实证检验[J]. 国际贸易问题，2022(8)：69-84.

Driving Carbon Emission Efficiency：The Mechanism and Spatial Effects of the Digital Economy in Yellow River Basin Cities

XU Wei，YANG Qi，ZHANG Yao，WANG Wenpeng

(School of Civil Engineering，Inner Mongolia University of Science and Technology，Baotou 014000，China)

Abstract：Using a projection pursuit model optimized with an accelerated genetic algorithm and a super-efficiency SBM model incorporating undesirable outputs，the level of digital economy development and carbon emission efficiency in cities along the Yellow River Basin were respectively measured. A series of econometric and spatial models were then constructed to empirically identify the direct，indirect and spatial effects of the urban digital economy on carbon emission efficiency. The findings indicate that the expansion of the digital economy significantly enhances carbon emission efficiency across Yellow River Basin cities，and this conclusion remains robust after five sets of sensitivity tests. Technological innovation，industrial synergistic agglomeration and unconventional water utilization function as intermediary channels through which the digital economy influences urban carbon emission efficiency. The magnitude of this positive effect varies across city types，being stronger in downstream areas than in upstream and midstream regions，and more pronounced in resource-based cities compared with non-resource-based ones. The digital economy generates positive spatial spillover effects on carbon emission efficiency.

Keywords：digital economy；carbon emission efficiency；Yellow River Basin；projection pursuit model；super-efficiency SBM；causal effects