马永刚,臧家根,范为,等.黄河流域城市能源转型赋能数字化绿色化协同发展:影响机制与空间溢出[J].中国沙漠,2026,46(5):64-77.

黄河流域城市能源转型赋能数字化绿色化协同发展:影响机制与空间溢出

马永刚[1a],臧家根[1b],范 为[2],燕 玲[3]

(1.兰州财经大学 a.工商管理学院,b.信息工程与人工智能学院,甘肃 兰州 730020;2.中国人事科学研究院,北京 100101;3.大连民族大学 国际商学院,辽宁 大连 116650)

摘要:本文立足黄河流域生态保护和高质量发展战略背景,考察城市能源转型对数字化绿色化协同发展的影响机制与空间溢出效应。基于2011—2021年76个地级市的面板数据,将新能源示范城市政策作为能源转型的准自然实验,运用耦合协调度模型测度数字化绿色化协同发展水平,并采用双重机器学习与空间杜宾模型进行因果识别与空间效应分析。结果表明:黄河流域城市能源转型显著促进数字化绿色化协同发展,该结论在经过一系列稳健性与内生性检验后依然成立。机制分析显示,城市能源转型通过推动技术创新、提升城市韧性与降低碳排放强度3条路径发挥作用。异质性分析显示,政策效应在非资源型城市、环保重点城市和非老工业基地城市表现更为强劲。空间杜宾模型显示,城市能源转型对数字化绿色化协同发展具有显著正向空间溢出效应,本地政策能够辐射带动邻近城市协同水平提升。

关键词:能源转型;数字化绿色化协同发展;黄河流域;双重机器学习;空间溢出效应

文章编号:1000-694X(2026)05-064-14 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00065

中图分类号:F205 **文献标志码**:A

0 引言

当前,全球能源体系加速向清洁低碳转型,数字技术与绿色发展深度融合已成为培育新质生产力、推动经济社会绿色转型的核心。2025年10月,党的二十届四中全会明确提出,坚持智能化、绿色化、融合化方向,加快建设新型能源体系,以碳达峰碳中和为牵引协同推进降碳、减污、扩绿、增长,将数字化绿色化协同(简称"数绿协同")发展作为现代化产业体系与美丽中国建设的关键抓手[1]。"十五五"时期,中国将持续推进能源清洁化替代、数字技术深度赋能实体经济、区域重大战略精准落地,以能源转型为纽带打通数绿协同传导链条[2]。新能源示范城市政策于2014年2月由国家能源局实施,通过试点示范带动能源结构优化与技术创新扩散,为识别能源转型赋能数绿协同发展的因果效应提供了准自然实验。同时,黄河流域生态保护和高质量发展已上升为重大国家战略[3]。2021年10月,中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》,部署能源绿色转型与数字智慧治理[4];2023年1月,工业和信息化部等4部门发布指导意见,明确能源低碳转型与产业数字化绿色化升级[5];2025年4月,国务院批复《黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》,要求以数字化统筹能源布局与生态保护,形成协同发力的政策支撑体系[6]。黄河流域横跨9省区,是中国重要生态屏障与能源基地,兼具能源禀赋突出与生态脆弱等特征,资源型与老工业城市占比高、能源路径依赖明显,跨区域空间溢出与协同治理需求迫切[7]。在此背景下,立足新能源示范城市政策外生冲击,揭示黄河流域城市能源转型赋能数绿协同发展的影响机制与空

收稿日期:2026-03-25;**改回日期**:2026-05-02

资助项目:甘肃省软科学项目(24JRZA173)

作者简介:马永刚(1981—),男,宁夏银川人,博士,副教授,主要从事区域经济与人文地理研究。E-mail:ygma2014@gmail.com

通信作者:臧家根(E-mail:19893162448@163.com)

间溢出，既是贯彻党的二十届四中全会精神、服务“十五五”规划与黄河国家战略的必然要求，也是破解流域发展失衡、推动生态优先与数字赋能深度融合的关键突破口，具有重要理论价值与现实意义。

现有研究主要基于双重视角。一是聚焦能源转型政策的赋能成效。早期研究从环境效应切入，围绕新能源示范城市政策，验证其减污降碳作用，并发现政策通过能耗约束、产业结构升级、绿色技术创新等路径，实现本地与邻近地区的协同增效[8-9]。在此基础上，学者进一步关注更广泛的经济社会影响，发现政策在提升绿色全要素能源效率、增强城市经济韧性、改善生态福利绩效等方面亦发挥了积极作用[10-12]。上述经济社会效应背后，是能源转型对城市发展动力的深刻重塑，研究表明，政策通过增加地方政府激励行为显著提升城市绿色创新活力，并在资源型城市中通过创新水平提升改善了能源效率[13-14]。上述文献从环境效应到经济社会影响再到发展动力重塑，系统揭示了能源转型政策的多元赋能成效，形成了较为完整的证据链条。二是聚焦数字化与绿色化发展水平的测度与驱动因素。早期研究从单一系统切入，分别测度数字化与绿色化的发展水平，发现二者均呈上升趋势且具有显著空间相关性，但区域间存在不均衡等差异[15-16]。上述研究为理解数字化与绿色化发展奠定了基础，但对二者协同互动的探讨仍显不足。近年来，随着“数绿协同”理念的深入推进，学者开始将二者纳入统一框架，发现中国整体、中部地区及长江中游等区域的数字化与绿色化协同发展水平整体提升，但呈现出显著的空间依赖性与非均衡格局，协同发展水平的等级转移受邻近地区影响[17-19]。上述文献从单一系统过渡到协同框架，为理解数字化与绿色化的互动关系提供了重要的实证支撑。

上述研究贡献卓著，但仍存拓展空间。第一，能源转型政策与数绿协同之间缺乏理论对接。现有研究多聚焦政策的环境或经济社会影响，较少将数字化绿色化作为协同系统，考察能源转型如何促进二者深度融合。第二，研究方法仍可优化。既有研究多采用双重差分、面板回归等方法，难以处理高维混杂因素与非线性关系。能源转型的技术溢出与产业关联天然具有跨区域特征，忽略空间溢出可能导致估计偏误，难以刻画区域协同真图景。第三，针对黄河流域的探讨不足。该区域兼具生态脆弱与能源依赖特征，将能源转型、数字化、绿色化三者纳入统一框架的研究较少，难以回应流域高质量发展的现实需求。

综上，文章拟从以下三方面推进现有研究。第一，研究视角上，将能源转型政策纳入数绿协同分析框架，揭示其通过推动技术创新、提升城市韧性与降低碳排放强度3条路径赋能数绿协同的内在逻辑。第二，研究方法上，构建双重机器学习+空间杜宾模型的组合策略，以双重机器学习（DML）提升高维非线性场景下政策估计稳健性，结合空间杜宾模型（SDM）识别本地—邻近空间效应。第三，研究对象上，聚焦黄河流域，以2011—2021年76个地级市的面板数据，刻画能源转型赋能数绿协同的异质性特征与空间溢出格局，为黄河流域生态保护和高质量发展提供可借鉴政策启示。

1　理论回顾与研究假设

1.1　黄河流域城市能源转型促进数绿协同发展

数字化与绿色化协同发展，本质是数字赋能绿色转型与绿色牵引数字发展的双向融合。数字化系统涵盖数字基础设施、数字产业化、产业数字化和发展环境4个维度，构筑了城市的数字支撑能力、产业活力、融合程度与创新环境；绿色化系统涵盖绿色经济、绿色生活、资源利用、生态状况与环境保护5个维度，反映城市在经济运行、社会民生、资源消耗、生态本底及污染治理等的绿色化进程。一方面，数字化为资源调度和环境监测提供工具，赋能支撑绿色化发展[20]；另一方面，绿色化通过碳减排约束与可持续消费理念，为数字技术开辟应用场景，牵引促进数字化低碳转型[21]。对黄河流域而言，能源转型作为新能源示范政策驱动的系统性变革，深刻作用于上述协同逻辑的供需两侧。从供给侧看，风、光等新兴产业天然具备数字化基因，其智能运维直接拉动数字基础设施投资与产业数字化需求[22]；清洁替代降低了环境成本，为绿色化发展夯实生态基底。从需求侧看，能源转型倒逼高耗能产业引入数字能源管理以应对能效与碳排放约束，加速产业数字化转型；居民用能清洁化通过分布式光伏、智能家居等培育绿色生活方式。黄河流域传统能源依赖形成的路径锁定，使能源转型过程内在地要求数字化与绿色化深度融合。据此，文章提出H1：黄河流域城市能源转型会显著促进数字化绿色

化协同发展。

1.2 黄河流域城市能源转型推动技术创新

能源转型伴随着大量研发投入，新能源技术的突破往往溢出至数字技术与环保技术领域[23]。其一，能源转型直接激励技术创新。新能源示范城市政策通常配套科技创新支持措施，直接推动数字技术与绿色技术的协同研发。从技术关联看，光伏材料研究催生新型半导体材料，智能微网技术应用于智慧城市管理，新能源消纳算法与人工智能调度具有一致性，技术溢出使能源转型成为创新“催化剂”[24]。其二，技术创新是数绿协同的核心驱动力。数字技术创新降低信息成本、优化资源配置，为产业数字化提供支撑；绿色技术创新提升资源效率、减少污染排放，为绿色化发展提供方案[25]。二者相互赋能。据此，文章提出H2：黄河流域城市能源转型可以通过推动技术创新来促进数字化绿色化协同发展。

1.3 黄河流域城市能源转型提升城市韧性

城市韧性是系统应对外部冲击并实现适应性转型的综合能力，涵盖经济韧性与生态韧性[26]。其一，能源转型直接提升城市韧性。能源转型引入新能源等多元化产业链条，拓宽产业基础、分散单一能源依赖，增强经济系统的抵抗恢复与适应调节能力[27]；清洁能源替代与生态修复则降低生态系统压力，提升生态系统的状态稳定与修复响应能力。新能源项目投资的长周期与稳定性，为地方经济与生态环境长期改善提供双重缓冲[28]。其二，城市韧性提升是数绿协同的重要保障。经济韧性强则财政稳健、政策定力足，能在冲击下维持对数字新基建与绿色转型的持续投入，避免数绿协同进程因短期扰动而中断[29]；生态韧性强则自然本底优、生态系统稳，为数字基础设施运行提供物理保障，同时降低数字经济活动的生态环境成本，为绿色化发展释放更多承载空间[30]。据此，文章提出H3：黄河流域城市能源转型可以通过提升城市韧性来促进数字化绿色化协同发展。

1.4 黄河流域城市能源转型降低碳排放强度

碳排放强度是衡量经济绿色化水平的核心指标。能源转型通过清洁能源替代、能效提升和产业结构优化三重路径直接推动碳强度下降，这一过程与数绿协同发展密切相关。其一，能源转型直接降低碳排放强度。清洁替代从源头减少单位产出碳排放，能效进步降低生产过程能耗，产业结构低碳化减轻高碳产业比重压力，三者共同驱动碳强度下降。其二，碳排放强度下降深化数绿协同。碳减排约束催生对数字技术的刚性需求，碳监测、调度与足迹追踪均依赖数字赋能。同时，碳强度下降倒逼数字基础设施绿色化转型[31]。碳目标与数字技术由此形成正向反馈：碳目标倒逼数字应用，数字赋能提升减排效率，协同空间持续释放。据此，文章提出H4：黄河流域城市能源转型可以通过降低碳排放强度来促进数字化绿色化协同发展。

1.5 黄河流域城市能源转型对数绿协同发展的空间溢出

地理邻近与经济关联使城市能源转型可能产生空间溢出，且兼具正向扩散与负向竞争的双重属性，其方向与强度取决于多重机制的叠加[32]。从正向扩散看，能源转型主要通过3条渠道产生空间溢出。知识溢出中，新能源技术与数字转型经验随人员流动、产业合作向邻近地区扩散，降低学习成本；产业关联中，能源转型引致的中间品需求带动上下游配套产业发展，将不同城市联结为紧密的产业链条；政策示范中，试点城市的成功经验被邻近地区借鉴，引发政策扩散与区域联动。从负向竞争看，空间溢出也可能表现为虹吸或挤出效应。中心城市可能虹吸周边要素形成“强者愈强”的马太效应；多地同时布局新能源若缺乏协同也易引发重复建设与同质竞争[33]。黄河流域生态经济互补且新能源产业天然要求协同。因此，尽管负向竞争可能存在，但正向扩散更可能主导。据此，文章提出H5：黄河流域城市能源转型对数字化绿色化协同发展具有正向空间溢出效应。

黄河流域城市能源转型赋能数字化绿色化协同发展的机理分析框架如图1所示。

2 研究设计

2.1 研究区域

研究区域聚焦黄河流域，选取青海省（西宁市）、甘肃省、宁夏回族自治区（不含中卫市、固原

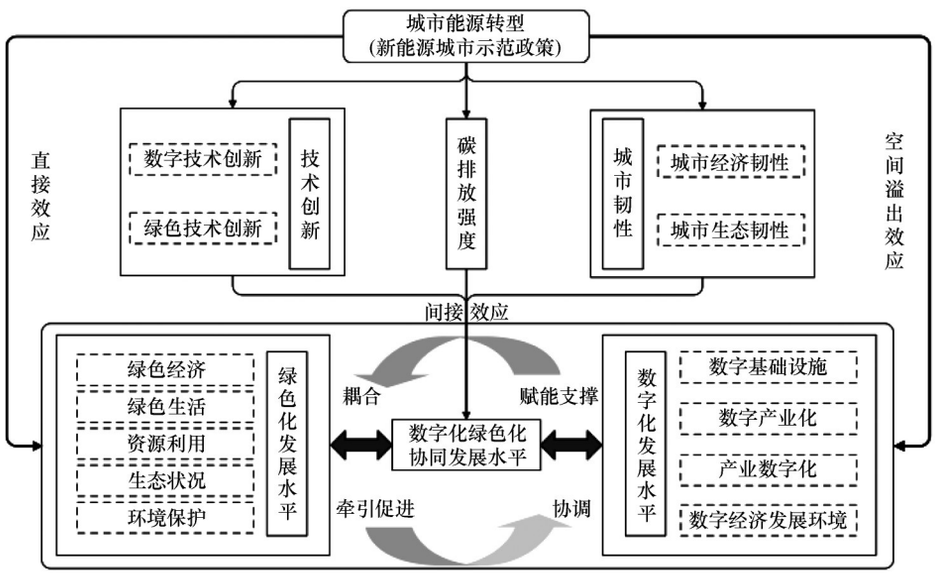
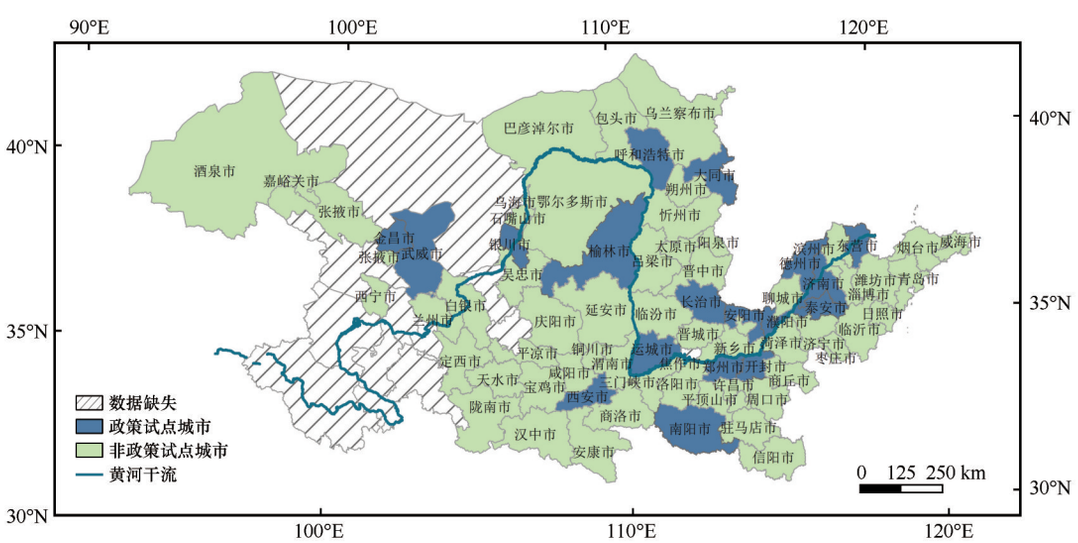


图 1　机理分析框架

Fig.1　Theoretical framework

市）、内蒙古自治区（不含赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市）、陕西省、山西省、河南省（不含济源市）及山东省共 8 省（区）76 个地级市（不含州、盟）[34]。甘南藏族自治州等虽是黄河流域重要的水源涵养区，但因核心数据缺失严重无法纳入研究。研究跨度为 2011—2021 年，涵盖新能源示范城市政策实施（2014 年），可完整捕捉政策动态效应。范围界定参考《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》并进行了空间校准。样本城市位于 32°—42°N、95°—119°E，具较强区域代表性（图 2）。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS（2024）0650 号标准地图制作，底图边界无修改

图 2　研究区域概况

Fig.2　General situation of the study area

2.2　研究方法

2.2.1　耦合协调度模型

耦合协调度模型源于物理学，用于测度系统间协同发展程度。文章将其应用于数字化与绿色化系统，量化二者的协调统一水平：

$$C_{it}=\frac{2\sqrt{U_{it}^{dig}U_{it}^{gre}}}{U_{it}^{dig}+U_{it}^{gre}} \tag{1}$$

$$T_{it}=\alpha U_{it}^{dig}+\beta U_{it}^{gre} \tag{2}$$

$$Score_{it}=\sqrt{C_{it}\cdot T_{it}} \tag{3}$$

式中：C_{it} 为耦合度；T_{it} 为协调度；$Score_{it}$ 为数绿协同

发展水平；U_{it}^{dig}、U_{it}^{gre}分别为数字化与绿色化子系统的熵值法综合得分；$\alpha=\beta=0.5$，为权重系数；$Score_{it}\in[0,1]$，值越大协同发展水平越高。

2.2.2 双重机器学习模型

为评估政策对数绿协同发展的因果效应，需应对试验区非随机设立问题。传统因果推断方法如双重差分模型依赖平行趋势假设，合成控制法对极端值敏感且适用情境有限，倾向得分匹配变量选择的主观性，均难以在高维、非线性条件下保证估计的无偏与稳健[35]。为此，Chernozhukov等[36]2018年提出双重机器学习框架，通过分离高维控制变量拟合与政策效应估计，并通过交叉拟合，能有效克服“维度诅咒”与模型误设问题，在处理复杂混杂因素时得到更稳健的因果估计。

借鉴张涛等[37]，构建部分线性回归的双重机器学习模型：

$$Score_{it}=\theta_0 Newenergy_{it}+g(X_{it})+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中：$E[\varepsilon_{it}|Newenergy_{it},X_{it}]=0$；$\theta_0$为政策平均处理效应；$Score_{it}$表示城市$i$在年份$t$的数绿协同发展水平；$Newenergy_{it}$为核心解释变量，表示城市$i$在年份$t$是否实施政策；$X_{it}$为控制变量；函数$g(X_{it})$指的是$X_{it}$对$Score_{it}$的非线性影响，由机器学习估计$\hat{g}(X_{it})$；$\mu_i$和$\lambda_t$为城市和年份固定效应；$\varepsilon_{it}$为误差项。

对式(4)进行估计$\hat{g}(X_{it})$，不可避免地引入“正则偏误”，收敛速度缓慢。为修正偏误并提升收敛，构建辅助回归式：

$$Newenergy_{it}=m(X_{it})+v_{it} \quad (5)$$

式中：$E[v_{it}|X_{it}]=0$；$m(X_{it})$为$Newenergy_{it}$对X_{it}的回归函数，指X_{it}通过$m(X_{it})$影响$Newenergy_{it}$，通过$g(X_{it})$影响$Score_{it}$，由机器学习估计$\hat{m}(X_{it})$；v_{it}为误差项。

首先，采用机器学习估计辅助回归$\hat{m}(X_{it})$，计算残差$\hat{v}_{it}=Newenergy_{it}-\hat{m}(X_{it})$；其次，采用机器学习估计$\hat{g}(X_{it})$，将主回归形式变为$Score_{it}-\hat{g}(X_{it})=\theta_0 Newenergy_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it}$；最后，将$\hat{v}_{it}$作为$Newenergy_{it}$的工具变量进行回归，获得无偏的政策效应估计量$\hat{\theta}_0$：

$$\hat{\theta}_0=\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\hat{v}_{it}\cdot Newenergy_{it}\right)^{-1}\cdot\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}\hat{v}_{it}\cdot\left(Score_{it}-\hat{g}(X_{it})\right) \quad (6)$$

2.2.3 空间自相关分析

空间自相关分析用于检验空间依赖性。全局莫兰指数(*Global Moran's I*)衡量流域整体空间关联模式，局部莫兰指数(*Local Moran's I*)则可识别各城市与周边的局部集聚类型[38]：

$$I=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(Score_i-\overline{Score})(Score_j-\overline{Score})}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\sum_{i=1}^{n}(Score_i-\overline{Score})^2} \quad (7)$$

$$I_i=\frac{(Score_i-\overline{Score})\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(Score_j-\overline{Score})}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Score_i-\overline{Score})^2} \quad (8)$$

式中：I、I_i为全局和局部莫兰指数；W_{ij}选取空间经济距离矩阵，以地理距离倒数与人均地区生产总值差值倒数之积构建，进行标准化处理。

2.2.4 空间杜宾模型

为考察黄河流域城市能源转型对数字化绿色化协同发展的空间溢出效应，采用双向固定空间杜宾模型(SDM)进行估计[39]：

$$Score_{it}=\alpha+\rho\sum_{j=1}^{N}W_{ij}Score_{jt}+\beta_1 Newenergy_{it}+\theta_1\sum_{j=1}^{N}W_{ij}Newenergy_{jt}+\sum_{k=1}^{M}\gamma_k X_{kit}+\sum_{j=1}^{N}W_{ij}\sum_{k=1}^{M}\delta_k X_{kjt}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中：ρ为空间自回归系数；β_1为$Newenergy_{it}$系数；θ_1为空间交互项系数；其余变量含义同上。

2.3 变量选取

2.3.1 被解释变量

被解释变量为数绿协同发展水平(*Score*)。遵循多维度综合评价的逻辑，分别构建数字化与绿色化发展水平的指标体系[40-44]，具体各级指标及属性见表1与表2。

2.3.2 解释变量

核心解释变量为城市能源转型(*Newenergy*)，以新能源示范城市政策为代理变量，采用多期双重差分设定：试点城市自政策实施年份起取值为1，否则为0。政策名单依据国家能源局文件整理，见图2。

2.3.3 控制变量

参考相关研究[45-46]，控制变量包括：经济发展水平(*Gdpcap*)，为人均地区生产总值取对数；人口规模(*Pop*)，为户籍人口取对数；城镇化率(*Urban*)，为非农业人口与户籍人口比值；产业结构(*Indstr*)，为

表 1　数字化发展水平评价指标体系

Table 1　Evaluation indicator system of digital development level

一级指标	二级指标	三级指标	属性
数字化	数字基础设施	每百人移动电话用户数	+
		每百人互联网宽带用户数	+
		长途光缆线密度	+
	数字产业化	人均电信业务总量	+
		信息传输、计算机服务和软件业从业人员占比	+
		人均邮政业务	+
	产业数字化	数字普惠金融指数	+
		人工智能、区块链、大数据、物联网、云计算等关键词词频	+
		电子商务销售额	+
		电子商务采购额	+
	数字经济发展环境	普通高等学校数量	+
		居民平均受教育年限	+
		R&D内部经费支出	+
		数字经济专利申请数	+

表 2　绿色化发展水平评价指标体系

Table 2　Evaluation indicator system of green development level

一级指标	二级指标	三级指标	属性
绿色化	绿色经济	人均地区生产总值	+
		第三产业增加值占地区生产总值比重	+
		第三产业从业人员比例	+
		平均工资	+
		城镇登记失业率	−
	绿色生活	生活垃圾无害化处理率	+
		每万人拥有公交车辆	+
		每万人拥有医师数	+
		每万人医疗机构床位数	+
	资源利用	单位地区生产总值能耗	−
		单位地区生产总值用水量	−
		单位地区生产总值二氧化碳排放量	−
		一般工业固体废物综合利用率	+
	生态状况	建成区绿化覆盖率	+
		人均公园绿地面积	+
		城市建成区绿地率	+
	环境保护	污水集中处理率	+
		二氧化硫排放量	−
		细颗粒物平均浓度	−
		空气质量全年优良率	+
		工业废水排放量	−

第三产业增加值与地区生产总值比值;绿色金融发展(*Grfin*),以绿色信贷、绿色投资等衡量,用熵值法计算;政府干预程度(*Govint*),为地方财政预算内支出与地区生产总值比值;人力资本水平(*Humcap*),为普通高等学校在校学生数与年末总人口比值;对外开放水平(*Open*),为实际利用外资额与地区生产总值比值;科学支出水平(*Tech*),采用科学支出与地方财政预算内支出比值;信息化水平(*Mobile*),采用平均每人拥有移动电话数。

2.3.4　机制变量

参考相关研究[47-49],机制变量包括:城市经济韧性(*Econre*),从抵抗与恢复能力、适应与调节能力、转型与发展能力三维度测度;城市生态韧性(*Ecolre*),从状态韧性、压力韧性、响应韧性三维度测度。上述韧性指数均采用熵值法计算。碳排放强度(*Caint*),为碳排放量与地区生产总值之比。数字技术创新(*Diteinv*)与绿色技术创新(*Grteinv*),为当年申请的数字经济与绿色技术相关专利数量取对数。

2.4　数据来源

原始数据来自2011—2021年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国工业统计年鉴》及北大数字金融研究中心,缺失值采用线性插值法填补,变量描述性统计见表3。

3　结果与分析

3.1　黄河流域数绿协同发展水平及分布格局

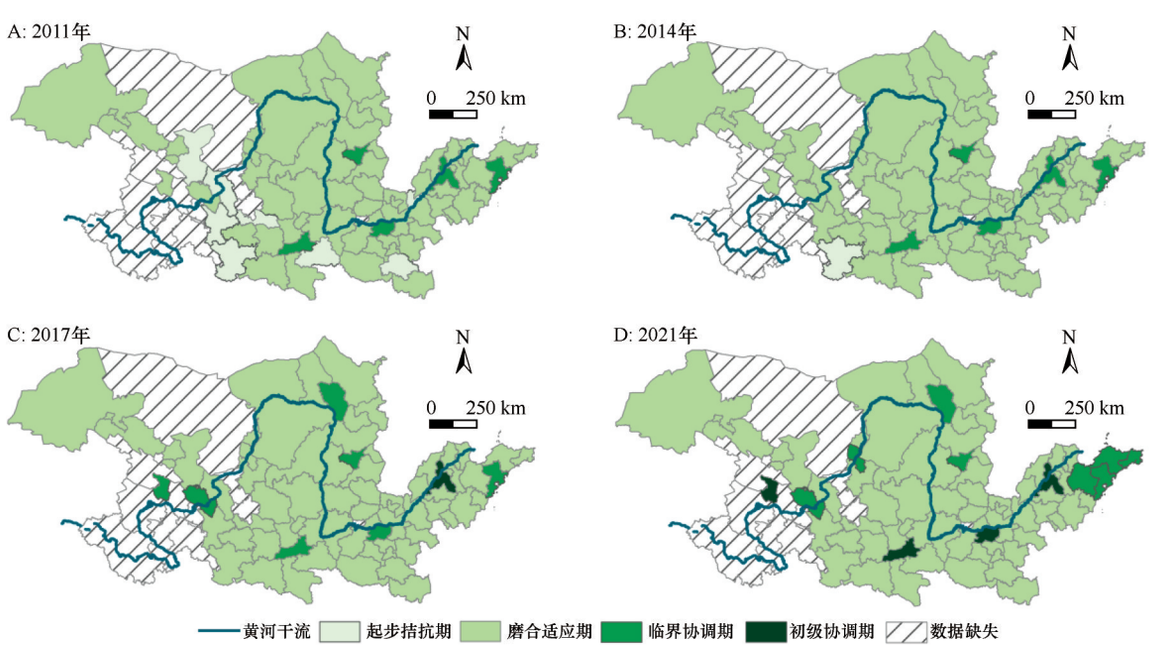
根据$Score_{it}$值将数绿协同发展水平划分为4种类型[50]:[0.00,0.20)为起步拮抗期,[0.20,0.35)为磨合适应期,[0.35,0.50)为临界协调期,[0.50,0.65)为初级协调期;基于ArcMap 10.8软件,对各城市关键年份的类型格局进行了时空可视化(图3)。

2011—2021年黄河流域数绿协同水平持续提升,区域差异收窄但非均衡仍在。时间上,2011年多数城市处于磨合适应期与临界协调期,起步拮抗期集中于上游甘肃及河南。2014年多数拮抗期城

表3 变量描述性统计分析结果

Table 3 Descriptive statistics of variables

变量类型	变量名称	符号	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	数绿协同发展	*Score*	836	0.283	0.054	0.157	0.530
解释变量	城市能源转型	*Newenergy*	836	0.172	0.378	0.000	1.000
控制变量	经济发展水平	*Gdpcap*	836	10.710	0.654	8.730	12.560
	人口规模	*Pop*	836	5.807	0.787	2.970	7.138
	城镇化率	*Urban*	836	0.355	0.173	0.107	0.967
	产业结构	*Indstr*	836	0.414	0.103	0.165	0.687
	绿色金融发展	*Grfin*	836	0.303	0.108	0.064	0.489
	政府干预程度	*Govint*	836	0.204	0.114	0.067	0.741
	人力资本水平	*Humcap*	836	0.020	0.027	0.000	0.140
	对外开放水平	*Open*	836	0.002	0.002	0.000	0.012
	科学支出水平	*Tech*	836	0.013	0.011	0.002	0.166
	信息化水平	*Mobile*	836	1.040	0.407	0.281	2.678
机制变量	城市经济韧性	*Econre*	836	0.073	0.039	0.025	0.299
	城市生态韧性	*Ecolre*	836	0.314	0.008	0.268	0.355
	数字技术创新	*Diteinv*	836	4.211	1.792	0.000	9.571
	绿色技术创新	*Grteinv*	836	3.775	1.816	0.000	8.214
	碳排放强度	*Caint*	836	2.706	2.019	0.266	16.450



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

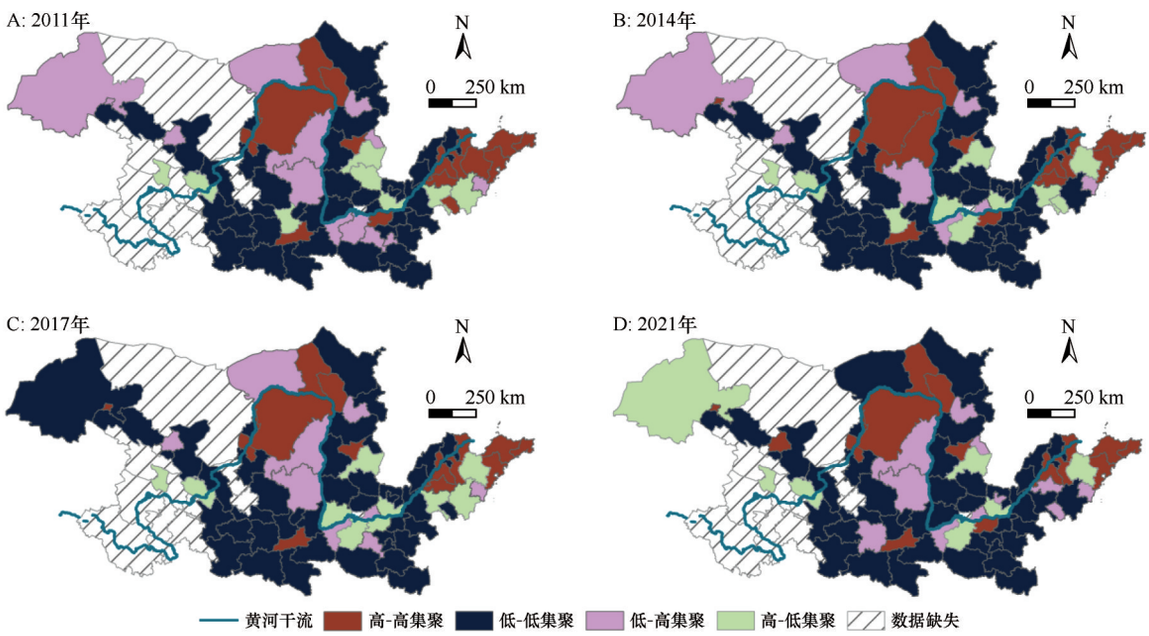
图3 黄河流域数字化与绿色化协同发展水平时空分布格局

Fig.3 Spatio-temporal distribution pattern of DGSD level in the Yellow River Basin

市跃升至磨合期。2017年呼和浩特、西宁、兰州等进入临界期。2021年西安等省会率先进入初级协调期,形成头部引领、多点突破格局。空间上,协同水平呈下游>中游>上游梯度,上游西宁、兰州、银川加速升级追赶明显,下游山东、河南长期保持临界期及以上,中游西安率先突破。整体协调类型由起

步拮抗期为主转向磨合适应期和临界协调期为主，但多数资源型城市和老工业基地仍停留在磨合适应期。

使用全局莫兰指数检验，2011—2021年指数均在1%水平上显著为正，表明城市间存在显著空间正相关性，有必要引入空间计量模型。基于局部莫兰指数对关键年份进行集聚分析（图4）。整体上，高高型分布于省会及沿海城市，低低型集中于资源型地区，低高/高低型交错分布。时间上，2011年高高型以济南等省会为核心，低低型分布于陕甘晋等资源型地区；2014年高高型稳定，低低型松动，嘉峪关、金昌跃升；2017年洛阳、巴彦淖尔由低高升为高低；2021年嘉峪关、金昌升为高高，酒泉升为高低，表明政策可打破低值锁定，但周边低值城市融入不足，但多数过渡型城市仍滞留低高/高低。空间上，山东半岛及省会形成稳定高值区；甘青宁以低值区为主，嘉峪关、金昌、酒泉跃升显示政策可打破路径依赖；晋陕豫交界密集分布过渡区，有待进一步升级。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作，底图边界无修改

图4　黄河流域数字化与绿色化协同发展水平空间集聚分布

Fig.4　Spatial clustering distribution of DGSD level in the Yellow River Basin

3.2　基准回归结果

采用双重机器学习模型，运用5折交叉验证，以随机森林算法拟合估计。结果见表4。列(1)仅加入控制变量一次项，列(2)同时加入二次项以捕捉非线性。无论是否加入二次项，*Newenergy*系数均在1%水平上显著为正，表明城市能源转型显著提升了黄河流域数绿协同水平，假设1得证。控制变量二次项联合显著，表明非线性关系存在，后续保留二次项设定。

表4　基准回归结果

Table 4　Baseline regression results

变量	(1)	(2)
	Score	*Score*
Newenergy	0.010***	0.009***
	(0.003)	(0.003)
控制变量一次项	是	是
控制变量二次项	否	是
年份固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
观测值	836	836

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为稳健标准误。

3.3　稳健性检验

为验证基准结果稳健性，进行了多维检验，结果汇总于表5。①对连续变量进行1%和5%缩尾处理，排除极端值干扰；②纳入同期实施的“智慧城市”政策虚拟变量，剔除并行政策干扰；③将研究区间限定为2011—2017年，排除预期与远期干扰；④加入省份×年份交互项，控制省级时变不可观测

因素；⑤将样本分割比例由5折调整为3折和7折，排除依赖于特定分割方式；⑥更换DML算法为梯度提升与支持向量机，排除依赖于特定算法。综上，*Newenergy*系数均显著为正且与基准回归高度接近，表明黄河流域城市能源转型对数绿协同发展的促进效应具有高度稳健性与可信度。

表5 稳健性检验结果

Table 5 Robustness test results

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	缩尾1%	缩尾5%	剔除并行政策	调整研究区间	时间省份交互	1∶2	1∶6	梯度提升	支持向量机
	Score	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*
Newenergy	0.010***	0.010***	0.010***	0.009***	0.010***	0.012***	0.009***	0.008***	0.024***
	(0.003)	(0.003)	(0.003)	(0.002)	(0.003)	(0.003)	(0.003)	(0.003)	(0.004)
控制变量一次项	是	是	是	是	是	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	836	836	836	532	836	836	836	836	836

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为稳健标准误。

3.4 内生性检验

尽管采用DML在一定程度上缓解了模型设定偏误，但政策评估仍面临三类内生性威胁：反向因果、遗漏变量和样本选择偏误。为此，文章分别构造3类工具变量进行检验：采用政策滞后一期缓解反向因果[51]，以省内其他城市政策实施比例缓解遗漏变量[52]，构造地形起伏度与时间趋势交互项缓解样本选择偏误。表6结果显示，*Newenergy*的系数始终显著为正，表明城市能源转型对数绿协同的促进效应并非由内生性驱动，因果推断具有高度可信性。

表6 内生性检验结果

Table 6 Endogeneity test results

变量	IV：政策滞后一期	IV：省内其他城市的政策实施比例	IV：地形起伏度与时间趋势交互项
	(1)	(2)	(3)
	Score	*Score*	*Score*
Newenergy	0.251**	0.272**	0.301***
	(0.105)	(0.119)	(0.113)
控制变量一次项	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是
年份固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
观测值	760	836	836

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为稳健标准误。

3.5 异质性

黄河流域横跨中国东中西部，城市间资源禀赋等差异显著，可能导致政策异质性。参考相关研究[53-54]，将样本分为资源型与非资源型、环保重点与非重点、老工业基地与非老工业基地3类进行分组回归（表7）。其中，资源型城市*Newenergy*系数不显著，非资源型显著为正。差异可能源于资源型城市长期依赖传统能源，吸收新能源技术能力弱，导致

表 7　异质性分析结果

Table 7　Heterogeneity analysis results

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	资源型城市	非资源型城市	环保重点城市	非环保重点城市	老工业基地城市	非老工业基地城市
	Score	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*	*Score*
Newenergy	0.001	0.016***	0.012***	0.004	0.006	0.009***
	(0.003)	(0.005)	(0.003)	(0.003)	(0.004)	(0.003)
控制变量一次项	是	是	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	440	396	363	473	275	561

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为稳健标准误。

政策红利难以释放；非资源型城市产业多元、要素流动强，更易接纳融合新能源技术。环保重点城市 *Newenergy* 系数显著为正，非重点不显著。差异可能源于环保重点城市政策与环境规制互补，放大了政策效果；非重点城市政府激励不足，企业缺乏转型紧迫感。老工业基地 *Newenergy* 系数不显著，非老工业基地显著为正。差异可能源于老工业基地传统制造业占比高与转型成本高，虽政策提供机遇，但受制于既有路径；非老工业基地产业结构轻盈，制度环境更具弹性，更易吸收政策红利。

3.6　影响机制

依据理论分析，进一步检验城市能源转型能否通过推动技术创新、提升城市韧性与降低碳排放强度促进黄河流域数绿协同发展，回归结果见表 8，系数均显著。城市能源转型能够通过推动技术创新、提升城市韧性与降低碳排放强度促进黄河流域数绿协同发展，原因在于 3 条路径分别从动力、保障与约束层面强化了数字化与绿色化深度融合。具体而言，新能源示范城市政策显著激发了数字技术创新与绿色技术创新。数字技术创新降低信息成本、优化资源配置；绿色技术创新提升资源效率、减少污染。二者相互赋能，共同驱动数绿协同发展[55]，假设 2 得证。同时，能源转型显著增强了城市的经济韧性与生态韧性。经济韧性保障了危机中数字化投入与绿色转型连续性，生态韧性提供了稳定的生态系统服务，更易接纳新技术，形成数绿良性互动[56]，假设 3 得证。此外，能源转型有效降低了碳排放强度，碳减排目标倒逼碳排放监测等数字化工具的广泛应用，而数字化应用亦需遵循低碳导向，二者形成紧密耦合，碳强度下降既体现绿色化提升，又深化数绿协同，假设 4 得证。

表 8　影响机制分析结果

Table 8　Mechanism analysis results

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	Score	*Econre*	*Ecolre*	*Diteinv*	*Grteinv*	*Caint*
Newenergy	0.009***	0.005**	0.002***	0.025*	0.031*	−0.037***
	(0.003)	(0.002)	(0.001)	(0.013)	(0.017)	(0.013)
控制变量一次项	是	是	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	836	836	836	836	836	836

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为稳健标准误。

3.7 空间溢出效应

3.7.1 模型检验与选择

进行LM、Wald、LR及Hausman检验，确定空间计量模型形式。LM检验显示空间误差与滞后同时存在；Wald和LR检验拒绝SDM退化；Hausman及LR检验支持双向固定。故选用双向固定SDM。

3.7.2 空间杜宾模型结果

结果如表9所示，*Newenergy*主效应系数显著为正，表明本地政策显著提升本地数绿协同发展。空间交互项系数显著为正，说明邻近政策对本地产生正向辐射。效应分解显示，直接、间接及总效应系数均显著为正，表明本地政策不仅显著提升本地数绿协同发展，还有利于提高邻近地区的协同发展，即黄河流域城市能源转型对数绿协同发展具有正向空间溢出效应，假设5得证。

4 结论与政策建议

4.1 结论

基于上述实证分析，得出以下结论：黄河流域城市能源转型能够显著促进数绿协同发展，揭示了能源转型在推动数绿协同中的新角色。研究发现，能源转型促进数绿协同，可以通过推动技术创新、提升城市韧性与降低碳排放强度3条路径实现传导，且作用并非“平均发力”，三者共同构成能源转型—机制传导—数绿协同的内在链条；黄河流域能源转型的政策效应在非资源型、环保重点和非老工业基地城市表现得更为强劲，而资源型、非环保重点和老工业基地城市的政策效果则不明显。同时，黄河流域城市能源转型对数绿协同发展具有显著的正向空间溢出效应，且存在不同空间集聚类型，即一个城市的能源转型不仅能够提升本地的数绿协同发展水平，还能通过技术扩散、产业关联与政策示范等渠道辐射带动邻近城市，为构建黄河流域能源–数字–绿色协同发展共同体提供了科学支撑。

4.2 政策建议

分类靶向施策，破解区域异质性难题。研究发现，政策效应在非资源型、环保重点和非老工业基地城市更为强劲，而在资源型、非环保重点和老工业基地城市效果不彰，故需实施差别化策略。对政策强劲区域，发挥辐射带动作用。支持建设先行示范区，在审批、绿色金融、用地等方面倾斜；组建技术扩散联盟，通过人才联合培养、数字平台共享，推动经验与技术外溢。对政策不彰区域，采取补短板与破锁定策略。一是设立转型专项基金，对传统能源企业拓展新能源给予补贴；对资源型城市利用废弃矿区建设风光储一体化基地，实现原地转型；对老工业基地城市加大智能制造与绿色技改投入，打破技术锁定。二是对非环保重点城市，提高环境规制标准并纳入流域统一考核，倒逼紧迫感；配套绿色采购、低碳补贴等正向激励，化压力为动力。

表9 空间杜宾模型效应分解结果

Table 9 Effect decomposition results of the spatial Durbin model

变量	主效应	空间交互项	直接效应	间接效应	总效应
Newenergy	0.006***	0.015**	0.006***	0.012**	0.018***
	(0.002)	(0.006)	(0.002)	(0.005)	(0.005)
控制变量	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是
观测值	836	836	836	836	836
R^2	0.885	0.885	0.885	0.885	0.885

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的显著性水平下显著；括号内数值为普通标准误。

畅通传导路径，激发数绿协同动力。研究发现，提创新、增韧性与碳减排是关键传导机制，故需从3条路径疏通链条。对提创新路径，设立数绿融合创新专项基金，支持智能电网、碳监测等研发与应用；在兰州、西安等节点布局“数绿协同创新中心”，推动产学研联合攻关，促进成果梯次转移。对增韧性路径，建立城市韧性监测预警平台，动态评估经济抗风险与生态承载能力；上游重点实施生态

修复，提升水源涵养与灾害抵御能力；中下游老工业城市优化产业结构，分散单一风险。对碳减排路径，将碳减排目标纳入政绩考核，强制推广重点用能单位碳排放监测与智能调度平台；引导数据中心、5G基站优先采用绿电，对达成绿电消纳与碳强度双降的城市给予用能奖励，形成降碳与数绿协同互促。

强化空间关联，形成跨域协同增益格局。研究发现，能源转型对数绿协同具有正向空间溢出且存在不同集聚类型，故需从整体和内部协同推进。整体层面，成立合作发展联盟，由黄河流域九省区轮流牵头，推动规划对接与政策协同共建；建立跨区域新能源产业协作平台，支持上游清洁能源输出与中下游消纳联动，鼓励下游数字技术赋能上游绿色转型，形成发电、调度、消纳一体化。内部层面，对山东半岛及省会等高值区，强化引擎功能，建设技术交易、碳交易服务平台和算力枢纽以辐射周边。对甘宁青等低值区，推动组团合作，鼓励联合申报项目，以规模降成本；加大财政对数字新基建和生态修复倾斜，突破低值锁定。对晋陕豫交界过渡区，打通向高值跃升通道，开展绿色数据中心试点，承接高值区功能外溢；建立高值区对口帮扶，在人才、技术、碳交易等方面定向支持，缩小差距。

参考文献：

[1] 中国共产党第二十届中央委员会.中国共产党第二十届中央委员会第四次全体会议公报[EB/OL].(2025-10-23)[2026-03-24]. https://cpc. people. com. cn/BIG5/n1/2025/1023/c64094-40588223.html.

[2] 中国发展改革报社.从各部委“十五五”规划前期研究中探重点[EB/OL].(2025-03-03)[2026-03-24].https://www.ndrc.gov.cn/wsdwhfz/202503/t20250303_1396401.html.

[3] 国家能源局.国家能源局关于公布创建新能源示范城市(产业园区)名单(第一批)的通知：国能新能〔2014〕14号[EB/OL].(2014-01-08)[2026-03-24].https://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201402/t20140212_1762.htm.

[4] 中共中央，国务院.黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要[EB/OL].(2021-10-08)[2026-03-24].https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/08/content_5641438.htm.

[5] 工业和信息化部，国家发展和改革委员会，科学技术部，等.关于深入推进黄河流域工业绿色发展的指导意见[EB/OL].(2023-01-12)[2026-03-24]. https://www. gov. cn/xinwen/2023-01/12/content_5736396.htm.

[6] 国务院.国务院关于《黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》的批复：国函〔2025〕37号[EB/OL].(2025-04-01)[2026-03-24]. https://www. gov. cn/zhengce/content/202504/content_7017567.htm.

[7] Lv Y, Li Y, Zhang Z, et al. Spatio-temporal evolution pattern and obstacle factors of water-energy-food nexus coupling coordination in the Yangtze River economic belt[J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 444: 141229.

[8] 姜浩，邓峰.新能源示范城市建设的减污降碳协同治理效应研究[J].软科学，2025，39(7)：60-69.

[9] 程洪飞，李豫新.能源转型与减污降碳协同治理：基于新能源示范城市政策的准自然实验[J].华东经济管理，2025，39(12)：108-118.

[10] 宋冰，李豫新.能源转型政策对城市减排与增效的影响[J].统计与决策，2026，42(2)：159-164.

[11] 许英达，胡彦迪.能源转型政策与城市经济韧性：基于示范城市的经验证据[J].统计与决策，2025，41(17)：58-63.

[12] 陈利，姚凤禹，苏宇童.能源变革与生态福利绩效研究：基于新能源示范城市设立的准自然实验[J].工业技术经济，2024，43(10)：98-108.

[13] 李豫新，程洪飞，倪超军.能源转型政策与城市绿色创新活力：基于新能源示范城市政策的准自然实验[J].中国人口·资源与环境，2023，33(1)：137-149.

[14] 王晨圣，杨乐.新能源示范城市建设对资源型城市能源效率的提升作用研究[J].地域研究与开发，2025，44(4)：74-82.

[15] 苏冰杰，卢方元，朱峰等.中国数字经济发展水平：时空特征、动态演化及影响因素[J].运筹与管理，2022，31(9)：161-168.

[16] 孙才志，童艳丽，刘文新.中国绿色化发展水平测度及动态演化规律[J].经济地理，2017，37(2)：15-22.

[17] 刘芸，谢国梁，崔乐乐等.数字化与绿色化融合水平的测度、区域差异与动态演进[J].统计与决策，2025，41(19)：66-71.

[18] 赵佳丽，张晓雅.中部地区城市数字化与绿色化协同发展演化与驱动因素分析[J].科学决策，2024(6)：32-50.

[19] 吴传清，宋用九，邓和顺.长江中游地区数字化绿色化协同转型发展水平测度与提升路径研究[J].长江流域资源与环境，2025，34(11)：2445-2458.

[20] Li J, Qamri G M, Tang M, et al. Connecting the sustainability: How renewable energy and digitalization drive green global value chains[J]. Journal of Environmental Management, 2025, 380: 124779.

[21] Guo X, Xu J. Carbon reduction in the AI era: How does urban digital intelligence transformation facilitate low-carbon development?[J]. Urban Climate, 2025, 61: 102449.

[22] 文艺，李何姗，张磊.数字基础设施，技术创新与能源消费低碳化[J].经济地理，2024，44(9)：144-152.

[23] 陈星星，田贻萱.数字化绿色化协同转型的理论阐释与未来路径[J].工业技术经济，2025，44(11)：96-104.

[24] Wang B, Wang J, Dong K, et al. How does artificial intelligence affect high-quality energy development? Achieving a clean energy transition society[J]. Energy Policy, 2024, 186: 114010.

[25] 李旭辉，陈梦伟，王经伟.省域数字化与绿色化协同发展评价，时空特征及其影响因素[J].经济地理，2024，44(7)：126-134.

[26] Meerow S, Newell J P, Stults M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban Planning, 2016, 147: 38-49.

[27] 刘建华,高新科,葛世帅等.黄河流域数字经济发展与能源利用效率的关联特征及作用机制[J].中国沙漠,2025,45(5):338.
[28] Seidu S, Chan D W M, Edwards D J, et al.A systematic review of green infrastructure and ecosystem-based technologies for climate resilience: development trends, research outlook and future projections[J]. Environmental Research Letters, 2025, 20(8):083001.
[29] Zeng L, Wen M, Li C, et al.Impact of digital greening synergistic transformation on urban economic resilience in China: evidence from quasi-natural experiments[J]. Humanities and Social Sciences Communications, 2025, 12(1):85.
[30] Zhang X.Research on the dynamic mechanism of digital economy system coupling to enhance urban ecological resilience[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(15): 22507-22527.
[31] 王群伟,杜倩,李振冉,等.数字化和绿色化转型的碳排放双控效果:基于制造业新质生产力的机制解析[J].中国管理科学,2025,33(11):321-335.
[32] 侯新烁,李圳,王鑫禹,等.省域绿色金融集聚对碳达峰压力影响的空间效应[J].经济地理,2026,46(1):161-170.
[33] Wu M, Zhang Q, He Y. Inclusion or exclusion: The impact of digital finance on intra-city economic inequality and its spatial spillover effect[J].Journal of the Knowledge Economy, 2026, 17(1):1305-1345.
[34] 赵林,宋小语,于伟等.黄河流域生态福利绩效时空格局演变及影响因素组态分析[J].地理科学进展,2025,44(12):2600-2614.
[35] Athey S, Imbens G W. Machine learning methods that economists should know about[J]. Annual Review of Economics, 2019,11(1):685-725.
[36] Chernozhukov V, Chetverikov D, Demirer M, et al. Double/debiased machine learning for treatment and structural parameters[J].The Econometrics Journal,2018,21(1):C1-C68.
[37] 张涛,李均超.网络基础设施、包容性绿色增长与地区差距:基于双重机器学习的因果推断[J].数量经济技术经济研究,2023,40(4):113-135.
[38] Zhou X, Liang Y, Li L, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and influence mechanisms of carbon emissions in China's 1997-2017[J].Journal of Cleaner Production, 2024, 485:144411.
[39] 柳江,李艳吉.数字新基建赋能黄河流域高质量发展:机制与空间溢出[J].中国沙漠,2025,45(5):369-379.
[40] 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.
[41] 陈小辉,张红伟.数字经济如何影响企业风险承担水平[J].经济管理,2021,43(5):93-108.
[42] 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.
[43] 陈永伟,陈志远,阮丹.中国省域数字经济的发展水平与空间收敛性分析[J].统计与信息论坛,2023,38(7):18-31.
[44] 国家发展和改革委员会,国家统计局,环境保护部,等.关于印发《绿色发展指标体系》《生态文明建设考核目标体系》的通知[EB/OL].(2016-12-22)[2026-03-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201612/t20161222_962826.html.
[45] 毛晓蒙,王仁曾.绿色金融与新质生产力:促进还是抑制?:基于技术创新与环境关注度的视角[J].上海财经大学学报,2024,26(5):30-45.
[46] 廖小菲,申雨瑶.数字经济对中国城市低碳转型的影响机理及效应[J].经济地理,2024,44(6):31-41.
[47] 张辽,姚蕾.数字技术创新对城市经济韧性的影响研究:来自中国278个地级及以上城市的经验证据[J].管理学刊,2023,36(5):38-59.
[48] 楚尔鸣,孙红果,李逸飞.智慧城市建设对生态环境韧性的影响研究[J].管理学刊,2023,36(6):21-37.
[49] Xiao L, Jia J, Lei Q, et al. Energy transition and urban green technological innovation: evidence from new energy demonstration city policy[J].Energy, 2026, 306:140641.
[50] 王静,姜明月,赵林.黄河九省(区)绿色低碳与数字经济耦合协调及障碍因子分析[J].山东科学,2025,38(2):89-99.
[51] Bellemare M F, Masaki T, Pepinsky T B. Lagged explanatory variables and the estimation of causal effect[J].The Journal of Politics,2017,79(3):949-963.
[52] 孙博文,杨霄斐,苏鑫.国家级大数据综合试验区促进数字化绿色化协同发展研究[J].重庆大学学报(社会科学版),2025,31(1):79-99.
[53] 国务院.国务院关于印发全国资源型城市可持续发展规划(2013-2020年)的通知:国发〔2013〕45号[EB/OL].(2013-11-12)[2026-03-24]. https://www. gov. cn/zhengce/content/2013-12/02/content_4549.htm.
[54] 刘亦文,邓楠.环境保护税是否有效释放了四重红利效应?[J].中国人口·资源与环境,2023,33(10):35-46.
[55] 李伟明,曹霞,张鑫.数绿技术融合、资产结构错配与企业高质量发展:知识组合能力的调节作用[J].管理评论,2025,37(11):54-66.
[56] 赵瑞东,方创琳,刘海猛.城市韧性研究进展与展望[J].地理科学进展,2020,39(10):1717-1731.

Urban energy transformation empowers digital-green synergistic development in the Yellow River Basin: mechanisms and spatial spillover effects

Ma Yonggang[1a], Zang Jiagen[1b], Fan Wei[2], Yan Ling[3]

(1.a.*School of Business Administration* / b.*School of Information Engineering and Artificial Intelligence*, *Lanzhou University of Finance and Economics*, *Lanzhou* 730020, *China*; 2. *Chinese Academy of Personnel Science Research*, *Beijing* 100101, *China*; 3.*International Business School*, *Dalian Minzu University*, *Dalian* 116650, *Liaoning*, *China*)

Abstract: Under the strategy of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, this study explores the mechanisms and spatial spillover effects of urban energy transformation on digital-green synergistic development (DGSD). Using panel data from 76 prefecture-level cities (2011−2021) and employing a quasi-natural experiment based on the New Energy Demonstration City policy, we apply a coupling coordination degree model, double machine learning, and the spatial Durbin model. The results show that urban energy transformation significantly promotes DGSD, a finding that holds after robustness and endogeneity tests. Mechanism analysis reveals three transmission pathways: technological innovation, urban resilience, and carbon emission intensity. Heterogeneity analysis indicates stronger policy effects in non-resource-based cities, key environmental protection cities, and non-old industrial bases. The spatial Durbin model shows positive and significant spatial spillover effects, where local policies enhance DGSD in neighboring cities.

Key words: energy transformation; digital-green synergistic development; Yellow River Basin; double machine learning; spatial spillover effects