

引用格式: 张泽楚, 李巍. 数字经济对黄河流域资源型城市绿色效率的驱动作用[J]. 资源科学, 2024, 46(3): 475–487. [Zhang Z C, Li W. Driving effects of digital economy on green efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2024, 46(3): 475–487.] DOI: 10.18402/resci.2024.03.04

数字经济对黄河流域资源型城市 绿色效率的驱动作用

张泽楚, 李 巍

(北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:【目的】数字经济有助于促进绿色效率的大幅提升,进而为推动新质生产力发展注入动力。探究资源型城市数字经济对绿色效率的作用机制,对资源型城市打破路径依赖、实现绿色转型和高质量发展具有重要意义。【方法】以黄河流域39座资源型城市为研究对象,结合城市地理分布、资源类型和发展阶段特征,采用DEA-SBM模型测算2003—2020年流域内资源型城市的绿色效率值及其动态变化,通过异质性分析、机制分析和非线性分析探究数字经济对绿色效率的驱动作用。【结果】①研究期内黄河流域资源型城市的绿色效率值先上升后趋于稳定,下游城市优于中上游城市,且石油型和再生型城市分别在资源类型和发展阶段类别中最高;②数字经济显著驱动了绿色效率提升。异质性检验表明,数字经济在上游城市、金属型和成熟型城市的作用效果相比中下游和其他类型的城市更显著;③数字经济主要通过绿色技术进步而非产业结构的中介效应来间接驱动绿色效率提升,城市群则对数字经济作用效果发挥正向调节效应;④非线性分析表明资源禀赋不具有门槛效应,数字经济作用效果在其自身的双重门槛中先增后减,而在年份的双重门槛中均递增,说明最优水平拐点尚未出现。【结论】数字经济有助于提升资源型城市绿色效率,据此建议应在全流域和城市群两个层面制定激励政策。在工业化基础上,利用数字经济这一新兴形态对原有产业进行适时适度地重塑与升级,以协同推进黄河流域资源型城市绿色转型和数字经济发展,并通过实施差异化措施进一步增强数字经济驱动绿色效率的作用效果。

关键词: 资源型城市; 绿色效率; 数字经济; 驱动作用; 黄河流域

DOI: 10.18402/resci.2024.03.04

1 引言

占黄河流域城市近半的资源型城市,2020年共容纳了全流域41%人口并贡献了38%GDP,消耗了51%水资源和46%电力,排放了53%、43%、50%和41%的工业二氧化硫、废水、烟尘和二氧化碳^[1]。因此,资源型城市在社会经济贡献和生态环境影响等方面对于黄河流域发展都具有重要作用。然而,受到产业结构单一、生态环境污染、“两高”项目存量高和经济增长动能不足等问题的长期困扰^[2],其发展质量和可持续能力受到了很大局限。研究和破解资源型城市绿色转型发展难题,已成为推进黄

河流域生态保护和高质量发展战略实施的关键一环。对此,学者围绕碳排放^[3,4]、生态效率^[5–8]、产业结构^[9,10]、绿色创新^[11]、城市收缩^[12]、资源诅咒^[13]和综合评价^[14–16]等方面进行了多学科、多视角研究,认为提高绿色效率暨平衡资源环境代价后获得的综合经济效率^[17],是促进资源型城市绿色转型发展的重要抓手,并指出解决问题的核心是寻找和构建一种资源环境友好的发展模式^[18],在保证经济增长的同时实现生态环境改善。

以数据资源和现代信息网络为关键要素和主要载体的数字经济,在全要素数字化转型驱动下已

收稿日期: 2023-09-13 修订日期: 2024-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(72050001)。

作者简介: 张泽楚,男,湖南常德人,硕士研究生,研究方向为环境经济学。E-mail: zzc1162661986@126.com

通讯作者: 李巍,男,辽宁沈阳人,教授,研究方向为环境经济分析与政策评估。E-mail: weili@bnu.edu.cn

成为一种新的经济形态。2023年国务院印发《数字中国建设整体布局规划》,发展数字经济已成为重要国家战略。已有研究表明,数字经济有助于打破产业发展低端锁定、破解资源环境刚性约束^[19]以及建设现代经济体系、实现高质量发展^[20],因而对提高绿色效率具有潜在效果^[21-23],但相关作用机制仍缺乏深入探究。《中国数字经济发展报告》显示2022年中国数字经济占GDP比重已达41.5%,而针对资源型城市绿色转型发展,数字经济能否以及如何发挥作用等关键问题亟待研究解答。为此,本文选取黄河流域39座资源型城市作为研究对象,并按照地理分布、资源类型和发展阶段分组分类,使用面板数据测算和分析2003—2020年城市绿色效率值及其动态变化,通过异质性分析、机制分析和非线性分析探究数字经济对绿色效率的驱动机制,以期为协同推进资源型城市绿色转型和数字经济发展提供决策依据。

2 理论分析与研究假设

2.1 数字经济对绿色效率的直接作用分析与假设

数字经济具有技术进步和生产要素的双重属性。一方面,数字经济通过优化要素配置和提高边际要素生产力,使企业生产尽可能落在生产前沿上并拓展可能性曲线边界,前者改善了要素扭曲和管理无效率,后者即熊彼特创新理论中“建立一种新的生产函数”。现有研究多从成本角度进行分析,认为数字经济通过规模效应、范围效应、锁定效应和长尾效应等降低了企业的生产成本和交易成本^[24,25],进而提升了生产效率;另一方面,数字经济本身就是一种生产要素,比如各类数据、设备及信息资料,葛和平等^[26]通过构建两部门模型,研究得到数字经济相比传统生产要素具有边际产出优势,更能驱动效率提升。

绿色效率相比传统生产效率考虑了资源环境约束,例如在投入时考虑资源利用并在产出时考虑环境污染,而数字经济的技术与要素属性本身就具有清洁低碳的绿色特征^[27]:在生产端,利用大数据、云网络等对企业生产进行实时智能监测,综合分析最适当的投入产出方式,将环境影响的负外部性内部化;在消费端,通过线上平台和物联网所提供的

线上购物和多渠道运输等服务,削弱“位置阻力”的同时,激发消费者对绿色产品的需求^[23],通过优化消费结构进而改善整个供应链条;此外,政府也能通过数字经济识别企业绿色创新潜力,缓解创新补贴及税收优惠中的错配问题,提高政策激励的有效性^[28]。总体而言,在三方同时进行动态优化调整的加持下,数字经济降低了现实中达到市场均衡的摩擦和噪声,改良了市场结构,极大提高了绿色效率水平^[29]。

基于以上分析,提出研究假设1:数字经济对资源型城市绿色效率具有正向驱动作用。

2.2 数字经济对绿色效率的作用机制分析与假设

数字经济具有技术创新属性,因此可考虑绿色技术进步的中介作用。一方面,绿色技术进步既可能由于上述原因提升绿色效率,也可能由于过分非理性投入造成恶性竞争,出现“回弹效应”而降低绿色效率;另一方面,数字经济的共享性、溢出性和高渗透性可能进一步提升城市整体的绿色技术水平,但也可能由于信息不对称,出现产权不明、专利不清和信息垄断等有损社会总福利的行为,阻碍绿色技术水平的进步。

关于产业结构,数字经济可通过智能化替代劳动和平台共享经济等供需两端改变产业结构特征,延伸产业链提高附加值,完善分工、专业化等产业组织方式,促进产业间的关联与融合,从而实现数字产业化和产业数字化;而更合理的产业形式,如资本、劳动密集型向技术、知识密集型的转变,促使经济增长的同时降低资源损耗和污染排放,改善资源型城市产业单一的现状,进而促进绿色效率的提升。

《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》(简称《纲要》)提出要“打造黄河流域高质量发展的增长极”,目前有32座资源型城市分属于黄河流域5个国家级城市群。相关研究表明城市群内部具有辐射带动作用,通过交通运输加速人流物流能流的快速流动,有助于打破空间限制并促进地区间要素的高效集聚^[30],因而城市群可能具有更优越的发展条件,具有增强数字经济的潜在效果。

基于以上分析,提出研究假设2:数字经济通过绿色技术进步和产业结构中介影响绿色效率,依托城市群可对数字经济作用效果发挥正向调节效应。

2024年3月

2.3 数字经济对绿色效率的异质性和非线性作用分析与假设

流域内资源型城市存在较明显的地理区位差异,交通条件、基础设施以及市场化程度等不尽相同;不同资源类型的城市,在资源禀赋和特色产业上具有明显区别;而处于不同的发展阶段,经济基础和产业结构^[6]、生命力和发展方式^[31]等方面也有所差异:数字鸿沟的出现使得索洛的“信息技术生产率悖论”仍不可忽视,信息红利对不同组别城市的作用效果可能不尽相同。

另外,资源禀赋是资源型城市形成和发展的重要依托,同时深刻影响了绿色转型的质量水平^[32],所以在不同资源禀赋地区数字经济可能具有不同的作用效果;数字经济因网络正外部性带来了规模经济和范围经济,其本身作为一种生产要素,可能受到“梅特卡夫法则”的支配呈现边际效应递增的特性^[33],也可能受到生产曲线凸性带来的边际报酬递减的影响;年份作为时间趋势,不同年份的城市数字经济与绿色发展也应当有所不同。因此,可认为在数字经济对绿色效率的驱动作用中,资源禀赋、数字经济和年份具有门槛效应。

基于以上分析,提出研究假设3:数字经济对绿色效率的驱动作用存在地理区位、资源类型和发展阶段的异质性,且资源禀赋、数字经济和年份在驱动作用中具有门槛效应。

3 研究区域、研究方法和数据来源

3.1 研究区域

资源型城市是以本地区矿产等自然资源开采、加工为主导产业的城市,根据《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》(下文简称《规划》)相关标准,将资源型城市按照地理分布、资源类型和发展阶段进行划分。黄河流域资源型城市共计42座,考虑数据的可获得性,剔除了陇南市、海西市以及2018年并入济南市的莱芜市,最终将39座资源型城市纳入研究(表1)。

3.2 研究方法

3.2.1 绿色效率值的测算

由于具有一定能求出可行解且考虑松弛变量的优势^[34],本文采用DEA-SBM模型测算黄河流域资源型城市的绿色效率值(表2),并结合其具体特征构建投入产出结构(表3)。

表1 黄河流域资源型城市及分组分类

Table 1 Overview of resource-based cities in the Yellow River Basin

地理分布	所属省份 (数量)	城市(所属国家级城市群) ^(a)	主要资源类型 ^(b)	发展阶段 ^(c)	人均GDP/ (元/人) ^(d)
上游	内蒙古(3)	包头(几字弯都市圈)	金属	再生型	102841.3
		乌海(几字弯都市圈)	煤炭	衰退型	100535.7
		鄂尔多斯(几字弯都市圈)	煤炭	成长型	163611.1
	甘肃(7)	金昌(无)	金属	成熟型	81363.64
		白银(兰西城市群)	金属	衰退型	32913.91
		武威(无)	煤炭	成长型	36027.4
		张掖(无)	金属	再生型	41327.43
		平凉(关中平原城市群)	煤炭	成熟型	25869.57
		庆阳(关中平原城市群)	石油	成长型	34633.03
	宁夏(1)	石嘴山(几字弯都市圈)	煤炭	衰退型	72266.67
中游	山西(10)	大同(无)	煤炭	成熟型	44193.55
		阳泉(无)	煤炭	成熟型	56212.12
		长治(中原城市群)	煤炭	成熟型	53836.48
		晋城(中原城市群)	煤炭	成熟型	65114.16
		朔州(几字弯都市圈)	煤炭	成长型	69182.39
		晋中(无)	煤炭	成熟型	43461.54
		运城(关中平原城市群)	煤炭	成熟型	34465.41
		忻州(几字弯都市圈)	煤炭	成熟型	38475.84
		临汾(关中平原城市群)	煤炭	成熟型	37909.32
		吕梁(几字弯都市圈)	煤炭	成熟型	45368.73
	陕西(6)	铜川(关中平原城市群)	煤炭	衰退型	53802.82
		宝鸡(关中平原城市群)	金属	成熟型	68584.34
		咸阳(关中平原城市群)	煤炭	成长型	55681.82
下游	山东(7)	渭南(关中平原城市群)	煤炭	成熟型	39786.78
		延安(无)	石油	成长型	70219.3
		榆林(几字弯都市圈)	煤炭	成长型	112672.2
		淄博(山东半岛城市群)	石油	再生型	77983.01
		枣庄(山东半岛城市群)	煤炭	衰退型	44896.37
		东营(山东半岛城市群)	石油	成熟型	136118.7
		济宁(山东半岛城市群)	煤炭	成熟型	53755.98
		泰安(山东半岛城市群)	煤炭	成熟型	50474.45
		临沂(山东半岛城市群)	非金属	再生型	43563.01
	河南(7)	洛阳(中原城市群)	金属	再生型	72634.56
		平顶山(中原城市群)	煤炭	成熟型	49218.44
		鹤壁(中原城市群)	金属	成熟型	62484.08
		焦作(中原城市群)	煤炭	衰退型	60340.91
		濮阳(中原城市群)	石油	衰退型	43766.58
		三门峡(中原城市群)	金属	成熟型	71127.45
		南阳(中原城市群)	石油	再生型	40390.95

注:(a)城市群所属依据《纲要》;(b)资源类型主要参考王涵等^[13]的划分标准及相关资料;(c)发展阶段依据《规划》;(d)人均GDP归属2020年。

表2 变量及描述性统计

Table 2 Variables and descriptive statistics

变量		具体内涵	符号	样本量	均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	绿色效率值	由DEA-SBM方法测算得到	<i>GE</i>	702	0.38	0.22	0.01	1.00
解释变量	数字经济	通过对“百人中互联网宽带接入用户数”“信息传输、计算机服务和软件业从业人员占单位从业人员比重”“人均电信业务总量”和“百人中移动电话用户数”4个指标使用熵值法得到的综合指数表示 ^[33,38]	<i>digit</i>	702	0.14	0.09	0.02	0.74
	基础设施	人均道路面积	<i>infra</i>	702	12.81	12.62	0.05	108.33
	对外开放度	<i>FDI</i> 与 <i>GDP</i> 之比 ^[39] ,并取对数	<i>lnopen</i>	702	-7.19	1.78	-12.68	7.56
	人力资本	普通中学在校学生数占年末总人口的比重,并取对数	<i>lnHR</i>	702	-2.78	0.24	-3.78	-2.09
	环境规制	使用工业烟(粉)尘去除率、工业SO ₂ 去除率、一般工业固体废物综合利用率、生活垃圾无害化处理率和污水处理厂集中处理率通过熵权法计算出的综合系数表示 ^[40] ,并取对数	<i>lnER</i>	702	-0.38	0.29	-1.75	0.24
	产业结构高级化	第三产业产值与第二产业产值之比 ^[41] ,并取对数	<i>lnTS</i>	702	-0.45	0.47	-2.00	1.26
中介变量	绿色技术进步	每万人绿色专利申请数,并取对数	<i>lngtech</i>	702	-1.84	1.60	-6.66	1.86
	产业结构合理化	泰尔指数 ^[41] ,并取对数	<i>lnTL</i>	702	-1.77	1.00	-9.06	0.54
调节变量	城市群	是否位于黄河流域五大城市群的虚拟变量	<i>cluster</i>	702	0.79	0.41	0.00	1.00
门槛变量	资源禀赋	采掘业从业人员占年末总人口的比重 ^[32]	<i>RE</i>	702	0.02	0.02	0.00	0.10

表3 DEA-SBM模型投入产出结构

Table 3 Input-output structure of the data envelopment analysis-slacks-based measure (DEA-SBM) model

一级指标	二级指标	三级指标	具体指标	单位
投入	要素投入	劳动力	年末从业人员数	万人
		资本	由永续盘存法算得固定资本存量 ^[35,36]	万元
	资源投入	用电量	基于夜间灯光修正的用电量	kW·h
		用水量	地区总用水量	亿m ³
产出	期望产出	地区生产总值	以2000年为基期的平减GDP	万元
	非期望产出	环境污染	对工业二氧化硫排放量、工业废水排放量和工业烟尘排放量3个指标使用熵权法计算出的综合污染水平	—
		碳排放	能源消耗×排放因子加总而成 ^[37]	万t

3.2.2 数字经济对绿色效率的驱动作用

本文采用基准回归、机制回归和非线性回归模型来探究黄河流域资源型城市中数字经济对绿色效率的驱动作用,以此验证本文提出的3个假设。

3.2.2.1 基准回归模型

$$GE_{it} = \beta_0 + \beta_1 digit_{it} + \beta_2 X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中: GE_{it} 表示*i*地区在第*t*年的绿色效率值; $digit_{it}$ 表示*i*地区在第*t*年的数字经济水平; X_{it} 为其他控制变量,包括基础设施(*infra*)、对外开放度(*lnopen*)、人力资本(*lnHR*)、环境规制(*lnER*)和产业结构高级化(*lnTS*); β_0 、 β_1 和 β_2 均为待估参数; u_i 和 δ_t 分别为个体

(城市)固定效应和时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。

3.2.2.2 机制回归模型

(1)中介效应

$$mediator_{it} = \beta_3 + \beta_4 digit_{it} + \beta_5 X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$GE_{it} = \beta_6 + \beta_7 mediator_{it} + \beta_8 X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$GE_{it} = \beta_9 + \beta_{10} digit_{it} + \beta_{11} mediator_{it} + \beta_{12} X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中: $mediator_{it}$ 为中介变量,包括绿色技术进步(*lngtech*)和产业结构合理化(*lnTL*); β_3 – β_{12} 均为待估参数。若 β_4 、 β_7 和 β_{12} 显著,则表示中介效应成立。

(2)调节效应

2024年3月

$$GE_{it} = \beta_{13} + \beta_{14}digit_{it} + \beta_{15}digit_{it} \times cluster_{it} + \beta_{16}X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中: $cluster_{it}$ 为是否位于黄河流域五大城市群的虚拟变量,包括山东半岛城市群、中原城市群、关中平原城市群、几字弯都市圈和兰西城市群;交乘项 $digit_{it} \times cluster_{it}$ 为城市群的调节效应; β_{13} – β_{16} 均为待估参数。若 β_{15} 显著,则表示调节效应成立。

3.2.2.3 非线性回归模型

(1) 门槛回归

若为单一门槛:

$$GE_{it} = \beta_{17} + \beta_{18}digit_{it} \cdot 1(threshold_{it} \leq \gamma) + \beta_{19}digit_{it} \cdot 1(threshold_{it} > \gamma) + \beta_{20}X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

若为双重门槛:

$$GE_{it} = \beta_{21} + \beta_{22}digit_{it} \cdot 1(threshold_{it} \leq \gamma_1) + \beta_{23}digit_{it} \cdot 1(\gamma_1 < threshold_{it} \leq \gamma_2) + \beta_{24}digit_{it} \cdot 1(threshold_{it} > \gamma_2) + \beta_{25}X_{it} + u_i + \delta_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

式中: $1(\cdot)$ 为示性函数,根据括号中表达式是否成立分别取值为1和0; $threshold_{it}$ 为门槛变量,包括资源禀赋(RE)、数字经济($digit$)和年份($year$); γ 为具体的门槛值; β_{17} – β_{25} 均为待估参数。

(2) 分位数回归

$$\min \sum_{i: y_i \geq \beta_\theta x_i} \theta |y_i - \beta_\theta x_i| + \sum_{i: y_i < \beta_\theta x_i} (1 - \theta) |y_i - \beta_\theta x_i| \quad (8)$$

s.t. $F(Y \leq y_\theta) = \theta$

式中: y_i 为被解释变量,本文中为绿色效率; x_i 为核心解释变量,本文中为数字经济; $F(Y \leq y_\theta)$ 为被解释变量的条件分布函数; θ 为分位点; β_θ 为待估参数。

3.3 数据来源

本文研究时间跨度为2003—2020年,所用数据均来自于《中国城市统计年鉴》和国家统计局及地方水利厅等网站公开信息,个别缺失值采用线性插值进行补全。另外,为减少变量的非线性影响并使样本整体更趋近正态分布,对部分控制变量采用取对数的做法,表2为具体变量及描述性统计结果。

4 结果与分析

4.1 绿色效率值测算结果分析

研究期内,黄河流域资源型城市绿色效率值的整体均值和增长率((末期-基期)/基期)分别为0.38和1.87,2003—2012年呈上升趋势,2012年后则呈先下降后上升的波动态势。其中,绿色效率值

大小排名前5的城市依次为:鄂尔多斯、泰安、东营、延安和淄博,绿色效率值增长率排名前5名城市依次为:乌海、鄂尔多斯、榆林、阳泉和焦作,分别代表了这些城市的发展现状和趋势较为良好。

从地理分布来看,下游城市绿色效率值明显高于同期中上游城市水平,并始终超出总体均值,且这种趋势在2010年后更为明显,这与黄河下游地区交通运输便利、工业基础好且发展水平高等因素有关(图1);从资源类型来看,石油型城市绿色效率值始终位于较高水平,金属型和煤炭型城市则时常低于均值,这可能与石油经济附加值高且环境压力较小,而金属和煤炭产业较为单一且开采更为粗放有关^[42](图2);从发展阶段来看,成熟型城市绿色效率值由于较完善的经济建设基本稳定在总体均值附

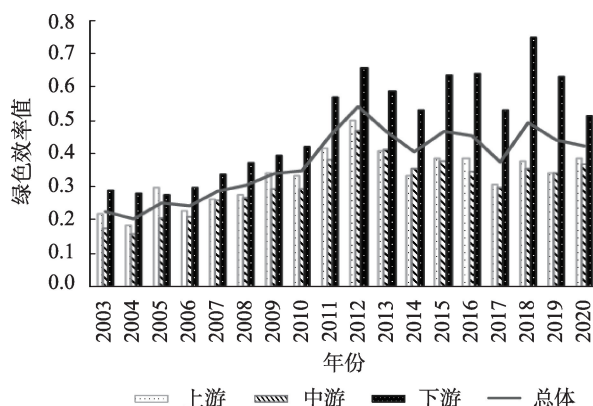


图1 2003—2020年不同地理分布的绿色效率值时空演变
Figure 1 Spatiotemporal change of green efficiency value in different geographic regions, 2003–2020

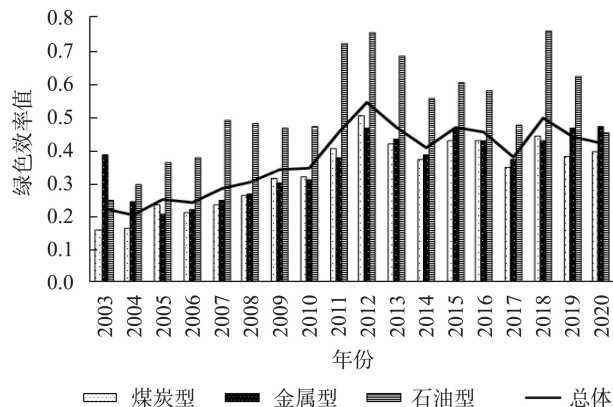


图2 2003—2020年不同资源类型的绿色效率值时空演变
Figure 2 Spatiotemporal change of green efficiency value in different stages of development, 2003–2020

近,衰退型城市则由于资源趋于枯竭受到经济、环境的双重压力造成绿色效率值较低,成长型城市具有较大发展潜力,其绿色效率值于2011—2013年达到顶峰,再生型城市在2013年后逐渐摆脱固有发展模式,绿色效率值明显领先于其他城市(图3)。

4.2 数字经济影响绿色效率的基准回归及异质性分析

4.2.1 基准回归

由于绿色效率值的值域为[0, 1],恰好符合受限被解释变量模型的使用条件,因此以Tobit模型作为基准回归模型,采用聚类稳健标准误差避免异方差和自相关现象的出现。依次加入控制变量,数字经济

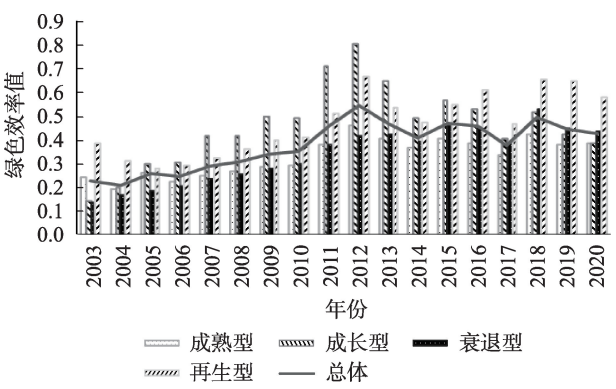


图3 2003—2020年不同发展阶段的绿色效率值时空演变
Figure 3 Spatiotemporal change of green efficiency value in different resource type cities, 2003–2020

(*digit*)的系数保持显著为正(表4),假设1得以验证,说明整体上数字经济对黄河流域资源型城市绿色效率具有正向驱动作用,这可归因于数字经济具有数据要素和技术进步的双重属性,一方面通过优化资源配置改进了生产方式,提高了要素的边际产出;另一方面降低了能耗水耗和污染排放,这意味着产能结构的升级。控制变量对绿色效率的影响方面,基础设施(*infra*)和人力资本(*lnHR*)呈正向显著关系,环境规制(*lnER*)和对外开放度(*lnopen*)呈负向显著关系,产业结构高级化(*lnTS*)则不显著。

4.2.2 异质性回归

根据不同分组和分类进行子样本回归,由表5可知数字经济对绿色效率的驱动作用具有显著异质性:数字经济对上游城市的作用效果高于下游和中游城市;对金属型城市的作用效果高于煤炭型和石油型城市;对成熟型城市的作用效果高于成长型、再生型和衰退型城市。

4.2.3 与长江经济带的对比分析

对比分析长江经济带数字经济对绿色效率的异质性作用^[43-45],数字经济均未在较为发达的下游城市发挥最好效果,而是在相对落后的上游更为显著。同样,数字经济在绿色效率较低的金属型和成熟型城市的效果也好于其他类型,一方面这是国家重视区域协调发展和数字基础设施建设的结果,另一方面可以推断数字经济在缩短地区差异、促进区

表4 基准回归结果
Table 4 Results of benchmark regression

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
<i>digit</i>	0.246** (0.113)	0.279** (0.138)	0.415*** (0.144)	0.448*** (0.144)	0.428*** (0.146)	0.441*** (0.146)
<i>infra</i>		0.00399*** (0.00100)	0.00385*** (0.00103)	0.00368*** (0.00108)	0.00361*** (0.00105)	0.00342*** (0.00109)
<i>lnopen</i>			-0.0174*** (0.00469)	-0.0182*** (0.00475)	-0.0177*** (0.00468)	-0.0169*** (0.00458)
<i>lnhr</i>				0.108*** (0.0346)	0.101*** (0.0348)	0.108*** (0.0361)
<i>lner</i>					-0.0657* (0.0338)	-0.0674** (0.0339)
<i>lnts</i>						-0.0388 (0.0295)
<i>_cons</i>	0.319*** (0.0388)	0.306*** (0.0461)	0.195*** (0.0468)	0.466*** (0.0985)	0.404*** (0.0998)	0.395*** (0.0997)

注:***、**、*分别表示在1%、5%、10%水平下显著,括号里为稳健标准误。下同。

2024年3月

表5 异质性分析结果

Table 5 Results of heterogeneity analysis

	整体	上游	中游	下游	成熟型	衰退型	成长型和再生型	煤炭型	金属型	石油型
<i>digit</i>	0.441*** (0.146)	0.709*** (0.206)	0.223* (0.130)	0.550* (0.283)	0.602** (0.248)	0.126 (0.213)	0.402* (0.226)	0.312** (0.146)	0.805*** (0.234)	-0.00583 (0.264)

域公平上具有重要作用,数字红利更有利于后发优势的实现。王军等^[46]提到中国较不发达地区数字化程度反而更高,数字经济的“锦上添花”效应要明显小于“雪中送炭”效应。黄河流域的经济发展水平相对而言不及长江流域,因而更需要在全流域、资源型城市和较落后地区大力开展数字经济建设。

4.3 稳健性检验

为避免内生性,在逐步回归、子样本回归并控制时间地区双向固定效应的基础上,进一步进行稳健性检验:①外生冲击检验。外生冲击检验本质上属于替换自变量的方法,借鉴赵涛等^[33]的研究,根据是否进行“宽带中国”试点,设置政策虚拟变量(*policy*)替代原有核心解释变量数字经济(*digit*)进行多期DID回归,并通过平行趋势检验;②设置工具变量。将数字经济(*digit*)的滞后一期项(*L.digit*)作为工具变量,分别使用极大似然估计和两步法估计建立iv-tobit模型,并进行过度识别和弱工具变量检验;③其他稳健性检验。依次进行去除异常值、前后缩尾1%和缩短时间窗口(将研究期替换为2011—2020年)的处理。根据检验结果,回归系数均保持了显著,模型具有良好的稳健性。

4.4 数字经济对绿色效率的作用机制分析

4.4.1 中介效应

考虑绿色技术进步和产业结构的中介作用,由表6可知产业结构合理化(*lnTL*)的中介作用不显著,结合上文控制变量中产业结构高级化(*lnTS*)也不显著,说明本文中产业结构发挥的作用有限,黄河流域资源型城市的数字经济尚处于要素、技术融合的初级阶段,未太多涉及到产业层面;而数字经济(*digit*)和绿色技术进步(*lngtech*)的系数均显著,说明该中介效应成立,且无需额外进行sobel检验。具体而言,绿色技术进步(*lngtech*)的系数为负,说明其对绿色效率产生了回弹效应,技术红利使得厂商变本加厉地进行资源开采,造成了过度消耗和污染

表6 机制分析结果

Table 6 Results of mechanism analysis

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
<i>digit</i>	0.441*** (0.146)	-1.013* (0.587)		0.427*** (0.143)	
<i>lngtech</i>			-0.0278*** (0.0106)	-0.0259** (0.0102)	
<i>digit</i>		0.608 (0.845)		0.389** (0.158)	
<i>lnTL</i>			-0.00931 (0.0194)	-0.0126 (0.0191)	
<i>digit</i>					0.334** (0.156)
<i>digit</i> × <i>cluster</i>					0.456*** (0.162)

加重的低效生产,而数字经济(*digit*)的系数为正,说明起到了一定程度的抑制作用,即通过自身的清洁性(减少污染)、共享性(缩小技术代差)和高渗透性(促进技术融合)降低中介变量对解释变量的负边际效应来间接驱动绿色效率的提升。

4.4.2 调节效应

考虑城市群对数字经济驱动绿色效率提升的调节作用,由表6可以发现交乘项的系数显著为正,说明城市群具有积极的正向调节效应,因而应进一步推进城市群的规划建设,发挥其要素集聚、技术集聚和产业集聚的经济效应,促进区域数字生态的形成,破除流动壁垒并进一步辐射带动周边城市。假设2得到部分验证。

4.5 数字经济对绿色效率的非线性作用分析

4.5.1 门槛效应

讨论针对核心解释变量的非线性作用机制,分别将资源禀赋(*RE*)、数字经济(*digit*)和年份(*year*)作为门槛变量进行门槛回归分析。由表7可知,资源禀赋(*RE*)的门槛效应并不显著,证明数字经济在不同资源禀赋的城市作用效果无明显区别,数字经济的创新性带来了大量新模式、新业态、新技术和

表7 门槛回归结果

Table 7 Results of threshold regression

门槛变量	门槛性质	F统计量	P值	临界值			门槛值	置信区间(95%)
				10%	5%	1%		
资源禀赋(re)	单门槛	11.09	0.40	20.73	26.26	32.55	0.01	[0.0066, 0.0078]
	双门槛	6.19	0.68	15.18	18.20	22.09	0.01	[0.0063, 0.0089]
数字经济(digit)	单门槛	54.67	0.00	24.16	27.61	37.01	0.07	[0.0715, 0.0726]
	双门槛	27.85	0.02	16.94	19.62	37.61	0.28	[0.2796, 0.2834]
年份(year)	单门槛	40.35	0.01	26.26	30.42	38.28	2016.00	[2014.50, 2017.00]
	双门槛	23.62	0.09	22.38	26.51	45.65	2008.00	[2006.00, 2009.00]

新产品,一定程度上摆脱了资源型城市对于既有资源的路径依赖。而数字经济(*digit*)自身和年份(*year*)都具有双重门槛效应:共性上,由于各项设施建设和规章制度的不完善,数字经济在早期的低水平发展阶段所产生的促进效果,不及发展至一定规模后所带来的规模经济和范围经济,这说明数字经济具有非线性的累积效应,与绿色效率之间呈现出类似“倒N型”的关系;个性上,对于数字经济(*digit*)本身,其作用效果在两个门槛处呈现先上升再下降的趋势,说明数字经济具有最优规模:低于下限说明相关基础设施建设滞后,尚未完成数字经济的“安装”过程,不能发挥出“网络效应”;超出上限后由于经济结构扭曲其边际报酬也将递减,符合生产要素的基本规律,与Acemoglu关于过度信息化间接抑制全要素生产率增长的判断一致;而对于年份(*year*),其作用效果分别于2008年和2016年得到了显著提升,可能是网络电商平台不断发展和三批“宽带中国”试点完成的结果。截至2020年,数字经

济规模还未达到最优拐点。假设3得到部分验证。

4.5.2 分位数回归

讨论针对被解释变量的非线性作用机制,分位数回归相比条件均值回归消除了极端值影响,可通过拟合不同分位点的多条回归曲线获取更多信息。分别取0.1、0.5和0.9作为分位点,联合分布检验表明,数字经济(*digit*)在不同分位的回归系数有95%的概率不完全相等。整体来说,随着被解释变量绿色效率(*GE*)的提升,数字经济(*digit*)的促进效果也在不断增强,说明二者间可能存在相互作用并形成了良性循环(表8):数字经济(*digit*)固然具有正向驱动效果,同时绿色效率的提升说明要素配置得到改善、生产函数得到优化、可能性边界得以拓展,地区经济发展意味着有更多的资金、人才和设备可用于发展数字经济,从而数字经济的要素边际报酬增加并进一步提升绿色效率,这为数字化与绿色化的协同发展提供了理论支撑。假设3得到部分验证。

表8 非线性回归结果

Table 8 Results of nonlinear regression

	基准回归	<i>digit</i> 为门槛	<i>year</i> 为门槛	<i>QR</i> _10	<i>QR</i> _50	<i>QR</i> _90
<i>digit</i>	0.441*** (0.146)			0.177*** (0.0594)	0.326*** (0.108)	0.372* (0.209)
门槛第1阶段		0.372 (0.580)	0.0999 (0.217)			
门槛第2阶段		1.695*** (0.363)	0.709*** (0.233)			
门槛第3阶段		1.284*** (0.252)	1.153*** (0.196)			

2024年3月

5 结论与政策建议

5.1 结论

打破路径依赖、提高绿色效率是促进黄河流域资源型城市绿色转型和高质量发展的关键。本文以黄河流域39座资源型城市为研究对象,结合城市地理分布、资源类型和发展阶段特征,采用DEA-SBM模型测算2003—2020年流域内资源型城市的绿色效率值及其动态变化,通过异质性分析、机制分析和非线性分析探究数字经济对绿色效率的驱动作用。主要结论如下:

(1)2003—2020年黄河流域资源型城市绿色效率值的整体均值大小和增长率分别为0.38和1.87,并呈现先上升后稳定的趋势。其中,绿色效率值均值大小排名前5的城市为鄂尔多斯、泰安、东营、延安、淄博,增长率排名前5的为乌海、鄂尔多斯、榆林、阳泉、焦作。从地理分布和资源类型来看,下游城市凭借区位优势其绿色效率值整体优于中上游城市,石油型城市则由于较高的经济附加值和较小的环境压力优于金属型和煤炭型城市;而对于不同的发展阶段,2013年之前成长型城市更有发展潜力,2013年后再生型城市摆脱路径依赖占据领先地位,最终表现为各类型城市绿色效率水平的趋同。

(2)数字经济通过数据要素和技术进步的双重属性从供需两端发挥了积极效应,对黄河流域资源型城市绿色效率起到了正向驱动作用;异质性分析表明,数字经济在绿色效率较低的上游城市、金属型和成熟型城市的效果要优于中下游和其他类型的城市,表明数字经济有助于缩小地区差异,更利于后发优势的建立。

(3)机制分析发现,数字经济对黄河流域资源型城市绿色效率的驱动作用主要通过绿色技术进步而非产业结构的中介效应实现,这与数字经济缓解了企业盲目追求技术红利带来的“回弹效应”,且目前其在产业层面的融合较为有限有关;城市群则对数字经济作用效果发挥了正向调节作用,通过经济集聚的发展趋势,优化了产业规模和布局。

(4)数字经济不具有资源禀赋的门槛效应,有助于资源型城市摆脱资源路径依赖;其作用效果在自身的双重门槛中先增后减,而在年份的双重门槛

中均递增,表明最优水平拐点尚未出现。此外,绿色效率提升带来的经济增长意味着有更多的资金、人才和设备可用于数字经济发展,因此数字经济和绿色效率之间还存在着互相促进的良性循环关系。

5.2 政策建议

数字经济为黄河流域资源型城市优化要素配置、破解路径依赖、加快产业升级以及实现节能降耗、减污降碳协同,带来了新的机遇和发展模式,是打造新质生产力、加快绿色转型、实现高质量发展目标的重要动能。为此,提出以下政策建议:

(1)协同推进黄河流域资源型城市绿色转型和数字经济发展。一方面,基于数字经济的双重属性发挥累积乘数效应,大力推进数字产业化、产业数字化、数据价值化和数字化治理的“四化”工程,实现城市绿色效率的提升;另一方面,由于良性循环关系的存在,利用绿色效率不断改善的红利,合理发展绿色清洁技术以降低企业成本,配合环境规制、减污降碳和高质量发展等政策实施,进一步加速数字经济相关要素、技术和产业在各环节的渗透与融合。此外,管理部门还应起到一定的引导、调控和规范作用,明晰数字专利产权归属,避免信息垄断和盲目竞争的出现。

(2)因地制宜地实施差异化战略,降低数字鸿沟的负面影响。下游地区包括山东和河南,具有良好的区位优势和地理环境,应学习长三角、粤港澳等发达地区先进数字技术和应用经验,利用外溢效应发挥辐射带动作用,借助山东半岛和中原城市群等平台载体打造数字化集群以实现区域内互补;中游地区包括山西和陕西,具有承上启下的中枢地位,应建立有效的区域协调与合作机制,推进数字资源的互联互通,还要结合自身特色,如大同和延安通过发展文旅产业,减少资源依赖的同时扩展数实融合领域;上游地区包括甘肃、宁夏和内蒙古的部分城市,作为流域发源地更需注重环保问题,可通过工业互联网等新技术手段提高资源利用率并实现在线监管,鄂尔多斯、乌海和榆林等人均GDP较高的城市需更加注重数字研发氛围的营造^[47],其他城市则应抓住数字化浪潮机遇缩小地区差异。

(3)在工业化基础上,利用数字经济这一新兴形态对原有产业进行适时适度地重塑与升级^[48]。产

品附加值较高的石油型城市如东营,应不断提升深加工能力,通过个性化定制服务丰富终端产品;煤炭型和金属型城市高排放高能耗问题严重,可利用人工智能实现资源的集约利用,并将可视化勘探技术应用于环境治理中。资源开发处于上升阶段、发展潜力大的成长型城市如朔州,应提前进行数字化新型产业的战略布局,力争从源头上解决“资源诅咒”问题;晋城、宝鸡等成熟型城市资源开发已趋于稳定,应借助数字经济进一步优化产业结构和拓展产业链条,避免“中等水平陷阱”;白银、铜川等衰退型城市是转型的重难点地区,经济发展滞后且生态环境压力大,应通过争取扶持和补贴,加强数字基础设施建设和数字技能培训并带动相关人员就业,由此产生新模式和新业态重新激发经济活力;再生型城市如包头,是黄河流域资源型城市转型发展的先行区,可试点建立数字化工业园区、大数据重点开发区等,以此作为城市群内的综合示范中心,为其他城市绿色转型提供借鉴参考。

参考文献(References):

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国城市统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China City Statistical Yearbook 2021 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.]
- [2] 丁利春. 煤炭资源型地区碳减排机理及优化路径研究: 以山西省为例[D]. 太原: 山西财经大学, 2022. [Ding L C. Research on the Mechanism and Path of Carbon Emission Reduction in Coal Resource-Based Areas: Take Shanxi Province as an Example[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2022.]
- [3] Dong R Y, Zhou X W. Analysis of the nonlinear and spatial spillover effects of the digital economy on carbon emissions in the Yellow River Basin[J]. Sustainability, 2023, DOI: 10.3390/su15065253.
- [4] Xu Z H, Ci F Y. Spatial-temporal characteristics and driving factors of coupling coordination between the digital economy and low-carbon development in the Yellow River Basin[J]. Sustainability, 2023, DOI: 10.3390/su15032731.
- [5] Yue L, Yan H Z, Ahmad F, et al. The dynamic change trends and internal driving factors of green development efficiency: Robust evidence from resource-based Yellow River Basin cities[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, DOI: 10.1007/s11356-023-25684-4.
- [6] 米世猛. 双重环境规制对黄河流域资源型城市转型效率的影响研究[D]. 淮北: 淮北师范大学, 2022. [Mi S M. The Influence of Dual Environmental Regulation on the Transformation Efficiency of Resource-Based Cities in the Yellow River Basin[D]. Huaibei: Huaibei Normal University, 2022.]
- [7] 岳立, 闫慧贞. 黄河流域技术进步对资源型城市绿色发展影响[J]. 科学学研究, 2023, 41(9): 1615-1626. [Yue L, Yan H Z. Impact of technological progress on green development of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Studies in Science of Science, 2022, 41(9): 1615-1626.]
- [8] 朱敏, 王凯丽, 唐海云. 绿色金融发展对生态效率的空间溢出效应研究: 以黄河流域资源型城市为例[J]. 金融发展研究, 2022, (4): 55-62. [Zhu M, Wang K L, Tang H Y. Study on the spatial spillover effect of green financial development on eco-efficiency: A case study of resource-based cities in the Yellow River Basin [J]. Journal of Financial Development Research, 2022, (4): 55-62.]
- [9] 卢硕, 张文忠, 李佳洺. 资源禀赋视角下环境规制对黄河流域资源型城市产业转型的影响[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(1): 73-85. [Lu S, Zhang W Z, Li J M. Influence of environmental regulations on industrial transformation of resource-based cities in the Yellow River Basin under resource endowment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 73-85.]
- [10] 冯俊华, 张沁蕊. 黄河流域资源型城市环境规制、技术创新效率与产业结构升级动态关联效应分析[J]. 经济界, 2021, (5): 26-34. [Feng J H, Zhang Q R. Analysis of the dynamic correlation effect of resource-based urban environmental regulation, technological innovation efficiency and industrial structure upgrading in the Yellow River Basin[J]. Economic Affairs, 2021, (5): 26-34.]
- [11] 王磊磊. 黄河流域绿色创新的时空演进特征与收敛趋势研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2022. [Wang L L. Study on Temporal Evolution Characteristics and Convergence Trend of Green Innovation in Yellow River Basin[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2022.]
- [12] 闫超华. 黄河流域中下游资源型城市收缩时空异质性及治理效能提升[D]. 天津: 天津理工大学, 2022. [Yan C H. Spatio-Temporal Heterogeneity and Improvement of Governance Efficiency of Resource-Based Cities Shrinkage in the Middle and Lower Reaches of the Yellow River Basin[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2022.]
- [13] 张子龙, 王博, 龙志, 等. 财政分权、产业升级、技术进步与“资源诅咒”: 基于黄河流域资源型城市的实证分析[J]. 经济经纬, 2021, 38(3): 133-141. [Zhang Z L, Wang B, Long Z, et al. Fiscal decentralization, industrial upgrading, technological progress and “Resource Curse”: Empirical analysis of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Economic Survey, 2021, 38(3): 133-141.]
- [14] 孟伟. 黄河流域资源型城市绿色转型评价及其影响因素研究[D]. 济南: 济南大学, 2022. [Meng W. Evaluation and Influencing

2024年3月

- Factor of Green Transformation of Resource-Based Cities in the Yellow River Basin[D]. Jinan: University of Jinan, 2022.]
- [15] 崔云昊. 黄河流域资源型城市转型发展能力评价及时空格局研究[D]. 太原: 山西财经大学, 2022. [Cui Y H. Evaluation of Transformation and Development Capability and Spatial-temporal Pattern of Resource-based Cities in the Yellow River Basin[D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2022.]
- [16] 阎晓, 涂建军. 黄河流域资源型城市生态效率时空演变及驱动因素[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 223-239. [Yan X, Tu J J. The spatiotemporal evolution and driving factors of eco-efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 223-239.]
- [17] 李荣杰, 李娜, 阎晓. 电力市场一体化对地区绿色经济效率的影响机制[J]. 资源科学, 2022, 44(3): 523-535. [Li R J, Li N, Yan X. Impact mechanism of electricity power market integration on regional green economic efficiency[J]. Resources Science, 2022, 44(3): 523-535.]
- [18] 汪明月, 李颖明, 王子彤. 工业企业不同类型绿色技术创新内在关联与绩效传导路径[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1534-1548. [Wang M Y, Li Y M, Wang Z T. Relationship and performance transmission paths of different types of green technology innovation in industrial enterprises[J]. Resources Science, 2021, 43(8): 1534-1548.]
- [19] 周清香, 李仙娥. 数字经济与黄河流域高质量发展: 内在机理及实证检验[J]. 统计与决策, 2022, 38(4): 15-20. [Zhou Q X, Li X E. Digital economy and high-quality development of the Yellow River Basin: Internal mechanism and empirical Test[J]. Statistics & Decision, 2022, 38(4): 15-20.]
- [20] 周清香, 何爱平. 数字经济赋能黄河流域高质量发展[J]. 经济问题, 2020, (11): 8-17. [Zhou Q X, He A P. High quality development of the Yellow River Basin empowered by digital economy[J]. On Economic Problems, 2020, (11): 8-17.]
- [21] 何维达, 温家隆, 张满银. 数字经济发展对中国绿色生态效率的影响研究: 基于双向固定效应模型[J]. 经济问题, 2022, (1): 1-8. [He W D, Wen J L, Zhang M Y. Research on the impact of digital economy development on China's green ecological efficiency: Based on two-way fixed effects model[J]. On Economic Problems, 2022, (1): 1-8.]
- [22] 刘强, 马彦瑞, 徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(3): 72-85. [Liu Q, Ma Y R, Xu S X. Has the development of digital economy improved the efficiency of China's green economy?[J]. China Population, Resources and Environment, 2022, 32(3): 72-85.]
- [23] 尹天宝, 赵红岩, 仲颖佳. 数字经济对城市绿色经济效率的影响研究: 基于空间面板模型的实证分析[J]. 技术经济与管理研究, 2023, (2): 18-22. [Yin T B, Zhao H Y, Zhong Y J. Research on the impact of digital economy on urban green economic efficiency: Empirical analysis based on spatial panel model[J]. Journal of Technical Economics & Management, 2023, (2): 18-22.]
- [24] 荆文君, 孙宝文. 数字经济促进经济高质量发展: 一个理论分析框架[J]. 经济学家, 2019, (2): 66-73. [Jing W J, Sun B W. Digital economy promotes high-quality economic development: A theoretical analysis framework[J]. Economist, 2019, (2): 66-73.]
- [25] 李三希, 黄卓. 数字经济与高质量发展: 机制与证据[J]. 经济学(季刊), 2022, 22(5): 1699-1716. [Li S X, Huang Z. Digital economy and high-quality development: Mechanism and evidence[J]. China Economic Quarterly, 2022, 22(5): 1699-1716.]
- [26] 葛和平, 吴福象. 数字经济赋能经济高质量发展: 理论机制与经验证据[J]. 南京社会科学, 2021, (1): 24-33. [Ge H P, Wu F X. Digital economy enables high-quality economic development: Theoretical mechanisms and empirical evidence[J]. Nanjing Journal of Social Sciences, 2021, (1): 24-33.]
- [27] 管宁, 何昌彦, 李博雅. 京津冀数字服务经济对绿色经济效率的影响研究[J]. 宏观经济研究, 2022, (7): 105-119. [Guan N, He J Y, Li B Y. A study on the impact of Beijing-Tianjin-Hebei digital service economy on green economy efficiency[J]. Macroeconomics, 2022, (7): 105-119.]
- [28] 李春涛, 闫续文, 宋敏, 等. 金融科技与企业创新: 新三板上市公司的证据[J]. 中国工业经济, 2020, (1): 81-98. [Li C T, Yan X W, Song M, et al. Fintech and corporate innovation: Evidence from Chinese NEEQ-listed companies[J]. China Industrial Economics, 2020, (1): 81-98.]
- [29] 许恒, 张一林, 曹雨佳. 数字经济、技术溢出与动态竞争政策[J]. 管理世界, 2020, 36(11): 63-84. [Xu H, Zhang Y L, Cao Y J. Digital economy, technology spillover and dynamic competition policy [J]. Journal of Management World, 2020, 36(11): 63-84.]
- [30] 康哲, 李巍, 刘伟. 黄河流域城市群工业减污降碳影响因素与策略[J]. 中国环境科学, 2023, 43(4): 1946-1956. [Kang Z, Li W, Liu W. Influencing factors and promoting measures of industrial pollution abatement and carbon reduction of the city clusters in the Yellow River basin[J]. China Environmental Science, 2023, 43(4): 1946-1956.]
- [31] 张国兴, 霍晓楠. 可持续发展政策促进资源型城市绿色发展了吗? 来自黄河流域的证据[J]. 创新科技, 2023, 23(2): 46-55. [Zhang G X, Huo X N. Does the sustainable development policy promote the green development of resource-based cities? Evidence from the Yellow River Basin[J]. Innovation Science and Technology, 2023, 23(2): 46-55.]
- [32] 李虹, 邹庆. 环境规制、资源禀赋与城市产业转型研究: 基于资源型城市与非资源型城市的对比分析[J]. 经济研究, 2018, 53(11): 182-198. [Li H, Zou Q. Environmental regulations, resource endowments and urban industry transformation: Comparative anal-

- ysis of resource-based and non-resource-based cities[J]. *Economic Research Journal*, 2018, 53(11): 182-198.]
- [33] 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. [Zhao T, Zhang Z, Liang S K. Digital economy, entrepreneurship, and high-quality economic development: Empirical evidence from urban China[J]. *Journal of Management World*, 2020, 36(10): 65-76.]
- [34] 卢丽文, 宋德勇, 李小帆. 长江经济带城市发展绿色效率研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2016, 26(6): 35-42. [Lu L W, Song D Y, Li X F. Green efficiency of urban development in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2016, 26(6): 35-42.]
- [35] 单豪杰. 中国资本存量K的再估算: 1952-2006年[J]. *数量经济技术经济研究*, 2008, 25(10): 17-31. [Shan H J. Reestimating the capital stock of China: 1952-2006[J]. *Journal of Quantitative & Technological Economics*, 2008, 25(10): 17-31.]
- [36] 张军, 吴桂英, 张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算: 1952-2000[J]. *经济研究*, 2004, (10): 35-44. [Zhang J, Wu G Y, Zhang J P. The estimation of China's provincial capital stock: 1952-2000[J]. *Economic Research Journal*, 2004, (10): 35-44.]
- [37] 吴建新, 郭智勇. 基于连续性动态分布方法的中国碳排放收敛分析[J]. *统计研究*, 2016, 33(1): 54-60. [Wu J X, Guo Z Y. Research on the convergence of carbon dioxide emissions in China: A continuous dynamic distribution approach[J]. *Statistical Research*, 2016, 33(1): 54-60.]
- [38] 黄群慧, 余泳泽, 张松林. 互联网发展与制造业生产率提升: 内在机制与中国经验[J]. *中国工业经济*, 2019, (8): 5-23. [Huang Q H, Yu Y Z, Zhang S L. Internet development and productivity growth in manufacturing industry: Internal mechanism and China experiences[J]. *China Industrial Economics*, 2019, (8): 5-23.]
- [39] 朱平芳, 张征宇, 姜国麟. FDI与环境规制: 基于地方分权视角的实证研究[J]. *经济研究*, 2011, 46(6): 133-145. [Zhu P F, Zhang Z Y, Jiang G L. Empirical study of the relationship between FDI and environmental regulation: An intergovernmental competition perspective[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(6): 133-145.]
- [40] 钟茂初, 李梦洁, 杜威剑. 环境规制能否倒逼产业结构调整? 基于中国省际面板数据的实证检验[J]. *中国人口·资源与环境*, 2015, 25(8): 107-115. [Zhong M C, Li M J, Du W J. Can environmental regulation force industrial structure adjustment? An empirical analysis based on provincial panel data[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2015, 25(8): 107-115.]
- [41] 干春晖, 郑谷, 余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. *经济研究*, 2011, 46(5): 4-16. [Gan C H, Zheng R G, Yu D F. An empirical study on the effects of industrial structure on economic growth and fluctuations in China[J]. *Economic Research Journal*, 2011, 46(5): 4-16.]
- [42] 胡博伟, 周亮, 王中辉, 等. 干旱区资源型城市绿色经济效率时空分异特征[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 383-393. [Hu B W, Zhou L, Wang Z H, et al. Spatiotemporal differentiation of green economic efficiency of resource-based cities in arid area[J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 383-393.]
- [43] 刘新智, 朱思越, 周韩梅. 长江经济带数字经济发展能否促进区域绿色创新? [J]. *学习与实践*, 2022, (10): 21-29. [Liu X Z, Zhu S Y, Zhou H M. Does the development of digital economy in the Yangtze River Economic Belt promote regional green innovation? [J]. *Study and Practice*, 2022, (10): 21-29.]
- [44] 刘寒松. 数字经济、技术创新与商贸流通业绿色全要素生产率提升动态关系: 基于长江经济带的实证分析[J]. *商业经济研究*, 2023, (17): 185-188. [Liu H S. Research on the dynamic relationship between digital economy, technological innovation and the improvement of green total factor productivity of commercial circulation industry: Based on the empirical analysis of the Yangtze River Economic Belt[J]. *Journal of Commercial Economics*, 2023, (17): 185-188.]
- [45] 裴潇, 袁帅, 罗森. 长江经济带绿色发展与数字经济时空耦合及障碍因子研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(10): 2045-2059. [Pei X, Yuan S, Luo S. Spatiotemporal coupling and obstruction factors between green development and digital economy in Yangtze River Economic Belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(10): 2045-2059.]
- [46] 王军, 车帅. 黄河流域数字经济对高质量发展的影响: 来自城市异质性的经验证据[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 780-795. [Wang J, Che S. The impact of digital economy on high-quality development in the Yellow River Basin: Empirical evidence from urban heterogeneity[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 780-795.]
- [47] 艾珂宇, 刘昌菊. 黄河流域资源型城市研发投入与经济增长的耦合协调及区域差异: 以榆林市为例[J]. *西安理工大学学报*, 2021, 37(3): 379-385. [Ai K Y, Liu C J. Coupling coordination and regional differences between research and development investment and economic growth of resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2021, 37(3): 379-385.]
- [48] 席振鑫, 马丽, 金凤君, 等. 黄河流域典型资源型城市工业转型的时空特征、类型与路径[J]. *资源科学*, 2023, 45(10): 1977-1991. [Xi Z X, Ma L, Jin F J, et al. Spatiotemporal characteristics, types, and paths of industrial transformation in typical resource-based cities in the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2023, 45(10): 1977-1991.]

Driving effects of digital economy on green efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin

ZHANG Zechu, LI Wei

(School of Environment, Beijing Normal University, State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The digital economy helps to promote the green efficiency greatly, and then injects power into promoting the development of new quality productivity force. Exploring the mechanism of digital economy on green efficiency in resource-based cities is of great significance for resource-based cities to break path dependence, realize green transformation and high-quality development. [Methods] Taking 39 resource-based cities in the Yellow River Basin as the research object, and considering their geographic distribution, resource types, and development stages, this study measured the green efficiency value of these cities and its dynamic change in 2003-2020 using the data envelopment analysis-slacks-based measure (DEA-SBM) model. Heterogeneity analysis, mechanism analysis, and nonlinear analysis were used to explore the driving effect of the digital economy on green efficiency. [Results] (1) During the study period, the green efficiency value of resource-based cities in the Yellow River Basin gradually increased and tended to be stable. The downstream cities were better than the middle and upstream cities, the petroleum cities were better than the coal and metal production dominant cities, and the regenerative type cities were better than the mature, growing, and declining cities; (2) The digital economy significantly promoted green efficiency. Heterogeneity analysis showed that the effect of the digital economy on upstream cities, metal production dominant cities, and mature cities is more significant than that of middle and downstream cities and other types of cities; (3) The digital economy indirectly drove the improvement of green efficiency mainly through the intermediary effect of green technology progress rather than industrial structure, and urban agglomerations played a positive moderating role on the effect of the digital economy; (4) The nonlinear analysis showed that resource endowment did not have a threshold effect. The effect of the digital economy first increased and then decreased in its own double thresholds, but increased in the double thresholds of the year, indicating that the optimal level inflection point had not yet appeared. [Conclusion] The digital economy contributes to the green efficiency of resource-based cities, so we recommend to formulate incentive policies at the levels of the whole basin and urban agglomeration. On the basis of industrialization, cities can use the digital economy to reshape and upgrade the original industries in a timely and appropriate manner to jointly promote the green transformation and the development of the digital economy of resource-based cities in the Yellow River Basin, and further enhance the role of the digital economy in driving green efficiency through the implementation of differentiated measures.

Key words: resource-based cities; green efficiency; digital economy; driving effect; Yellow River Basin