数字化转型对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率的影响

谭海航，刘晓平

（青海大学财经学院，西宁 810016）

摘要：推动西部地区煤炭产业绿色转型对统筹能源安全与区域可持续发展具有重要意义。为此，选取 2009—2024 年西部 11 个省级行政区的面板数据，利用 SBM-GML（基于松弛测度的全局马尔奎斯特-伦伯格）指数模型测度煤炭产业绿色全要素生产率（GTFP），实证考察数字化转型的影响及其作用机制。研究发现，数字化转型显著提升了西部煤炭产业的绿色全要素生产率，通过生产端技术赋能、管理端协同优化以及要素端配置改善，驱动绿色高质量发展。机制分析表明，技术进步是数字化转型赋能 GTFP 提升的关键中介路径。异质性分析进一步揭示，该促进效应在西南地区及经济发达省份更为凸显，而经济欠发达地区受限于数字基础设施及人才储备，效应尚不显著。因此应通过强化技术融合、实施差异化区域策略及完善协同制度，释放数字化红利，为在保障能源安全背景下的西部煤炭产业绿色发展提供支撑。

关键词：数字化转型；煤炭产业；绿色全要素生产率；西部地区；技术进步

中图分类号：F426.21 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)17－0093－08

在“双碳”目标与“数字中国”战略部署的共同驱动下，中国能源体系正加速由要素驱动向绿色低碳转型，进入系统性重塑的关键阶段。煤炭作为中国主体能源，其发展不仅关乎国家能源安全，也深刻影响经济社会可持续发展进程。然而，长期以来煤炭产业高度依赖资源投入与规模扩张，呈现出高消耗、高排放的发展特征，在资源约束趋紧与环境治理压力加大的双重背景下面临严峻转型挑战。尤其是西部地区，既是中国重要的能源接续基地，也是生态安全屏障，其煤炭产业发展同时承载“能源保供”与“生态约束”的双重目标，使得传统发展路径难以为继，绿色转型任务更具紧迫性与复杂性[1]。与此同时，以人工智能、大数据和云计算为代表的数字技术加速渗透实体经济，正在重塑传统产业的生产方式与组织形态[2]。数字化转型通过强化信息整合能力与资源配置效率，为突破要素配置瓶颈与提升生产效率提供了新的技术路径。对于煤炭等高耗能、高排放行业而言，数字技术在生产过程监测、能源利用优化及污染排放控制等方面具有显著潜力，有望在兼顾效率提升与环境改善之间发挥协调作用。在此背景下，数字化转型能否成为破解煤炭产业路径依赖、推动其绿色转型的重要工具，尤其是能否有效提升煤炭产业绿色全要素生产率，成为一个亟待回答的重要问题。

1 文献综述

在“双碳”目标与可持续发展战略背景下，绿色全要素生产率（green total factor productivity，GTFP）成为衡量经济发展质量的重要指标。既有研究普遍认为，数字技术通过提升要素配置效率、优化生产流程以及强化技术创新，能够有效促进绿色全要素生产率提升[3-4]。具体而言，数字化转型通过增强供应链协同、降低信息不对称并推动产业链重构，从而实现资源要素的精准匹配与高效利用，在农业、制造业等领域均表现出显著的绿色增长效应[5-8]。

相较而言，关于数字化转型对煤炭产业绿色发展的研究仍相对有限。已有文献主要从能源效率、供应链韧性及产业协同等视角展开，发现数字技术能够通过提升能源利用效率与优化资源配置，间接促进煤炭产业绿色发展[9-11]。然而，现有研究多停留于单一维度，缺乏对煤炭产业绿色全要素生产率

收稿日期：2026-04-23

作者简介：谭海航（2001—），男，重庆人，硕士研究生，研究方向为产业经济学；通信作者刘晓平（1971—），女，青海西宁人，硕士，教授，硕士研究生导师，研究方向为产业经济与计量经济。

这一综合绩效指标的系统考察。进一步来看，西部地区煤炭产业兼具能源保供与生态约束双重属性，其数字化转型不仅面临绿色发展要求，还受到基础设施与要素供给约束，因此其作用机制及效果可能呈现显著区域异质性。

鉴于此，研究选取西部地区11个省级行政区（不含西藏）2009—2024年的面板数据作为研究样本，实证考察数字化转型对煤炭产业绿色全要素生产率的影响。本文的边际贡献主要有以下两点：①相较于已有文献多集中于制造业、农业等领域探讨数字化转型对绿色发展的影响，将研究对象拓展至煤炭产业这一资源型关键产业，拓展了数字化转型与绿色发展研究的产业应用场景；②从现有文献研究关注煤炭产业能源效率、污染减排等单一维度，转到构建兼顾经济与生态双重绩效的评价指标，从综合绩效视角刻画煤炭产业绿色发展水平。研究结论可为西部地区在保障能源安全前提下推动煤炭产业绿色高质量发展提供一些合理化参考。

2 理论分析与研究假设

2.1 数字化转型对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率的直接效应

绿色全要素生产率（GTFP）是在考虑资源投入、期望产出与非期望产出的约束下，对生产效率的综合刻画，其本质反映了在环境约束条件下生产函数的优化程度。基于生产函数理论与要素配置理论，数字化转型（digital transformation，DIG）通过影响技术进步路径与要素配置效率，对绿色全要素生产率产生重要影响。

在生产端，数字化转型体现为偏向性技术进步。相较于传统技术进步，数字技术更倾向于节能降耗与污染控制方向，从而在既定资源约束下改变生产函数形态。在煤炭产业中，智能传感设备、物联网与数字孪生技术的应用，有助于实现生产过程的精细化控制，降低能源消耗与污染排放强度，从而在提升期望产出的同时抑制非期望产出，促进绿色技术效率提升[12]。

在管理端，数字化转型通过降低信息不对称与交易成本，提升企业内部资源配置效率。依据信息经济学理论，信息不完全会导致资源错配与效率损失，而数字平台通过实现数据集成与实时共享，有助于优化生产调度、设备维护与环境管理决策，从而减少无效投入与环境风险，提高企业运行效率并降低非合意产出。

在要素端，数字化转型通过缓解要素错配问题，提升资源配置效率。根据要素错配理论，资本、劳动力与能源在不同生产单元之间的配置偏离最优状态会显著抑制全要素生产率。数字技术通过提升信息透明度与匹配效率，引导资源向高效率与低污染生产环节流动，同时促进知识溢出与技术扩散，从而改善整体绿色要素配置效率。基于上述分析，提出如下假设。

H1：数字化转型能够显著提升西部地区煤炭产业绿色全要素生产率。

2.2 数字化转型中的技术进步中介作用

如果说追求绿色全要素生产率的本质是一场兼顾效率与可持续性的深刻变革，那么技术进步无疑是这场变革的内核驱动力，它决定了能否在生态保护红线内创造更大的经济价值。根据内生增长理论，技术进步（technological change，TC）通过改变生产函数形态，是实现资源约束下效率提升与环境改善的重要途径。数字化转型作为新一轮技术变革的重要载体，能够通过促进技术进步，间接影响绿色全要素生产率。

一方面，数字化转型通过推动生产技术升级，促进煤炭产业核心工序的智能化与自动化。数字技术与采掘、洗选及运输等环节的深度融合，有助于减少人为操作误差，提高生产精度与资源利用效率，从而实现节能降耗与污染减排，推动绿色技术进步[13]。另一方面，数字化转型通过促进技术扩散与跨界融合，加速绿色技术的创新与应用。依托工业互联网与大数据平台，企业能够突破区域与组织边界，实现技术知识的共享与传播，从而缓解西部地区技术供给不足的问题。同时，数字技术在污染监测与环境治理中的应用，使得企业由“末端治理”向“源头控制”转变，进一步提升绿色生产效率[14]。因此，数字化转型不仅直接作用于绿色全要素生产率，还可能通过促进技术进步发挥间接影响。基于此，提出如下假设。

H2：技术进步在数字化转型影响西部地区煤炭产业绿色全要素生产率的过程中发挥中介作用。

数字化转型影响煤炭产业绿色全要素生产率的机制如图1所示。

3 研究设计与指标选取

3.1 模型设定

3.1.1 双向固定效应模型

为实证检验数字化转型对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率的影响，构建如下模型：

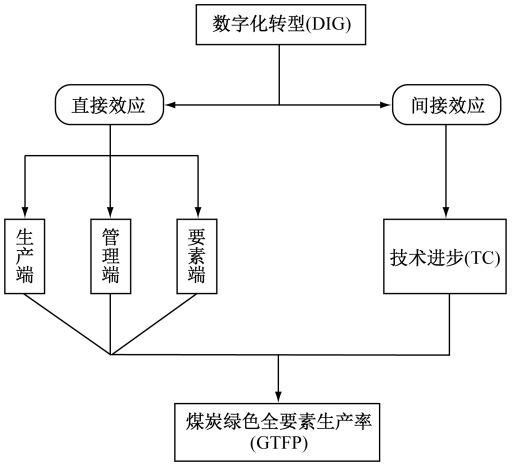


图 1　数字化转型影响煤炭产业绿色全要素生产率的机制

$$GTFP_{it}=\alpha_0+\alpha_1 DIG_{it}+\alpha_2 Controls_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中:i 为省份;t 为年份;$GTFP_{it}$ 为 i 省份在 t 年的绿色全要素生产率;DIG_{it} 为核心解释变量,表示数字化转型程度;$Controls_{it}$ 为一系列控制变量;μ_i 为省份固定效应,用以控制不随时间变化的个体异质性;λ_t 为年份固定效应,用以控制宏观冲击;ε_{it} 为随机扰动项;α_0 为常数项;α_1、α_2 为系数。

3.1.2　中介效应模型

为进一步检验技术进步的中介作用,借鉴温忠麟和叶宝娟[15]的方法,构建如下中介效应模型:

$$GTFP_{it}=\alpha_0+\alpha_1 DIG_{it}+\alpha_2 Controls_{it}+\mu_i+\lambda_t+\varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$TC_{it}=\beta_0+\beta_1 DIG_{it}+\beta_2 Controls_{it}+\mu_i+\lambda_t+\nu_{it} \quad (3)$$

$$GTFP_{it}=\gamma_0+\gamma_1 DIG_{it}+\gamma_2 TC_{it}+\gamma_3 Controls_{it}+\mu_i+\lambda_t+\eta_{it} \quad (4)$$

式中:TC_{it} 为中介变量,表示 i 省份在 t 年的绿色技术进步水平;β_0、γ_0 为常数项;β_1、β_2、γ_1～γ_3 为系数。

3.1.3　SBM-GML 模型

为了实现对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率(GTFP)的精准测算,同时规避传统径向数据包络分析(data envelopment analysis,DEA)模型在应用中的关键缺陷:一方面,该模型难以识别并改进投入产出变量中存在的松弛部分,另一方面,其在模型架构上未能有效纳入非期望产出这一重要约束条件,因此参考蔡林美等[16]的研究思路,引入非径向、非角度的超效率 SBM 模型(slack-based measure-super-efficiency),再基于全局生产可能集框架构建 GML(global Malmquist-Luenberger,全局马尔奎斯特-伦伯格指数)进行动态分析,测算得到各省份、各年份的绿色全要素生产率,再以基期为准进行累积处理。

3.2　变量说明

3.2.1　被解释变量

被解释变量为绿色全要素生产率(GTFP),参考蔡林美等[16]的做法,从投入和产出两方面构建煤炭产业 GTFP 测度体系。投入指标包括资本存量(永续盘存法测算)与劳动投入(煤炭开采和洗选业全部从业人员平均人数)。产出指标区分为期望产出与非期望产出。期望产出以各省原煤产量与工业总产值的比值表征资源产出;非期望产出由工业废水、废气及固体废物构成。对于部分省份统计年鉴未单独披露煤炭行业"三废"数据的问题,采用煤炭产业产值占工业总产值的比重作为折算系数,对工业整体"三废"数据进行折算,以获取煤炭行业非期望产出指标。煤炭产业绿色全要素生产率测算指标见表 1。

表 1　煤炭产业绿色全要素生产率测算指标

指标		资本投入	资本存量
投入		劳动投入	煤炭行业开采与洗选中实际投入的劳动量
产出	期望产出	资源产出	原煤总产量/工业产值
	非期望产出	固废	环境污染排放
		水废	
		气废	

3.2.2　核心解释变量

核心解释变量为数字化转型程度(DIG)。由于难以直接获取煤炭产业层面的数字化投入数据,采用"政府数字化关注度 + 数字专利产出"构建省级数字化转型代理指标,重点刻画区域数字技术供给与政策支持环境。

结合吴非等[17]、曾辉祥等[18]、赵涛等[19]、黎新伍等[20]的研究,一方面,系统梳理各省份政府工作报告中数字技术关键词,如人工智能、大数据、云计算、区块链的词频,以此作为地方政府数字化发展重视度的核心代理变量;另一方面借鉴万攀兵等[21],孙勇等[22]的研究,搜集各省份数字经济相关专利申请量,以反映数字技术应用与创新活跃程度。最后利用熵值法合成数字化转型综合指标。

3.2.3　中介变量

中介变量为技术进步(TG)。参考相关研究,利用 MATLAB 对 GML 指数进行分解,提取技术进步指数,并将其作为中介变量纳入模型分析。

3.2.4　控制变量

为了使研究结果更加精确,加入了以下控制变

量：①人力资本水平（HC），以大专及以上学历人口占总人口比重衡量；②经济发展水平（LGDP），使用人均 GDP 取对数衡量；③产业结构（IS），用第二产业增加值与 GDP 之比衡量；④对外开放程度（OPEN），以进出口总额占 GDP 比重衡量；⑤环境规制（ER），以工业污染治理投资占工业增加值比重衡量。变量定义见表 2。

表 2　变量定义

变量类型	变量名称	变量符号	变量定义
被解释变量	绿色全要素生产率	GTFP	非径向 SBM-GML 指数
核心解释变量	数字化转型	DIG	政府工作报告中关于数字化领域出现的词频数和省份关于数字专利的申请量合成
中介变量	技术进步	TC	GTFP 指数分解得来
控制变量	经济发展水平	LGDP	人均 GDP 取对数处理
	人力资本水平	HC	大专及以上学历人口数/总人口
	产业结构	IS	第二产业增加值/GDP
	对外开放程度	OPEN	（进口总额＋出口总额）/GDP
	环境规制	ER	工业污染治理投资/工业增加值

3.3　数据来源与描述性统计

3.3.1　数据来源

采用 2009—2024 年西部地区 11 个省级行政区（不含西藏）的面板数据作为基础样本。数据来源主要包括：宏观统计类（《中国统计年鉴》《中国工业统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国能源统计年鉴》及各省统计年鉴）、政策类（各省政府工作报告）、专利技术类（国家知识产权局）以及经济普查类（《中国经济普查年鉴》）。对于上述数据来源中出现的个别年份或省份的缺失值，采用均值插补法进行初步填补，并辅以平均增长率法加以验证与完善，以最大限度降低数据缺失对估计结果的影响。

3.3.2　描述性统计

变量描述性统计结果见表 3，可以看出被解释变量绿色全要素生产率（GTFP）的最大值为 1.716，最小值 0.089，标准差 0.334，这揭示了西部地区煤炭产业绿色全要素生产率在区域层面呈现出显著的不平衡发展特征，部分省份的绿色全要素生产率水平相对滞后，仍存在较大的提升空间。核心解释变量中最大值为 0.892，最小值为 0.002，这也说明数字化转型程度在西部各省之间也有较大差距，需要缩小省份之间的数字化转型差距。

表 3　变量描述性统计

变量名称	样本数	平均值	标准差	最小值	最大值
GTFP	176	0.504	0.334	0.089	1.716
DIG	176	0.148	0.164	0.002	0.892
HC	176	0.019	0.006	0.008	0.035
LGDP	176	9.037	0.229	8.363	9.577
IS	176	0.408	0.050	0.315	0.538
OPEN	176	0.114	0.073	0.008	0.401
ER	176	0.004	0.004	0.001	0.031
TC	176	1.123	0.943	0.068	10.368

4　实证检验与结果分析

4.1　基准回归结果

表 4 汇报了数字化转型对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率影响的基准回归结果。其中，列（1）为核心解释变量单独回归的结果，列（2）展示了纳入各控制变量后的回归估计结果，列（3）则报告了经稳健标准误处理后的估计结果。总体来看，无论是否加入控制变量，核心解释变量数字化转型（DIG）的估计系数均在 1% 的显著性水平上保持正向显著。这一结果表明，数字化转型对西部地区煤炭产业绿色全要素生产率具有显著的促进作用，由此假设 H1 得到实证支持。这说明，数字化转型一方面通过优化资源配置与生产工艺，提高煤炭产业的资源利用效率；另一方面通过强化污染控制与末端治理，减少污染物排放强度，最终实现绿色全要素生产率的正向增长。总体而言，数字技术的嵌入为西部地区煤炭产业绿色高质量发展提供了重要支撑。

表 4　基准回归结果

变量	GTFP		
	（1）	（2）	（3）
DIG	0.601***	0.820***	1.072***
	（0.178）	（0.212）	（0.333）
HC		0.223	12.670
		（11.60）	（12.43）
LGDP		−0.160	−0.811**
		（0.251）	（0.311）
IS		1.969***	4.026***
		（0.733）	（0.917）
OPEN		−0.272	−1.241
		（0.486）	（0.785）
ER		9.294*	9.402
		（5.354）	（5.777）
常数项	0.956***	1.472	5.891*
	（0.056）	（2.210）	（2.740）
样本数	176	176	176
R^2	0.510	0.542	0.214
Province FE	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes

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

4.2 稳健性检验

为了确保检验结果的准确性，进一步做稳健性检验，结果见表5。使用3种稳健性检验的处理方法。①缩尾处理。为了防止数据中的极端值影响检验结果，剔除样本中所有变量的最高1%和最低1%数值后进行回归。②剔除特殊样本。研究所收集的数据是西部地区11个省级行政区的，其中重庆市为直辖市，有着直辖市的特殊性，因此剔除重庆市，只用10个省份进行回归测度。③替换核心解释变量。原始数字化转型指标由熵值法合成，进一步采用主成分分析法重新构建综合指标DIG2，以检验不同测度方法下结论是否稳健。表5结果表明，在不同稳健性检验方法下，核心结论总体保持稳定，说明基准回归结果具有较强的稳健性。

表5 稳健性检验结果

变量	缩尾处理	剔除直辖市	替换解释变量
	GTFP	GTFP	GTFP
DIG	0.820***	0.532**	
	(0.212)	(0.232)	
DIG2			0.713***
			(0.202)
Controls	Yes	Yes	Yes
样本数	176	160	176
R^2	0.542	0.553	0.535
Province FE	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes

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

4.3 内生性处理

4.3.1 滞后解释变量

考虑到被解释变量与核心解释变量之间可能存在反向因果而引起的内生性问题。为缓解这一担忧，采用核心解释变量的滞后项作为工具变量，分别将数字化转型的一阶滞后项与二阶滞后项纳入回归模型进行分析。表6列(1)和列(2)显示，滞后1期和滞后2期的数字化转型变量估计系数分别为0.635和0.569，各滞后项系数都显著且方向为正，表明数字化转型对绿色全要素生产率的正向影响存在持续性，同时也为缓解反向因果所引发的内生性偏误提供了一定程度的支持。

4.3.2 工具变量法

借鉴黄群慧等[23]的做法，以1984年百万人邮局数×全国信息技术服务收入的交叉项作为数字化转型的工具变量(IV)来缓解内生性。一方面，历史邮政基础设施会影响后续信息网络基础，从而与地区数字化发展相关，满足相关性；另一方面，历史邮局分布本身不会直接影响2009—2024年煤炭产业绿色全要素生产率，只能通过数字化转型间接作用，满足外生性。由于交叉项为截面数据，因此需要乘以虚拟时间趋势以匹配面板数据[24]。具体回归结果见表6。列(3)的工具变量第2阶段回归系数显著为正，同时不可识别检验与弱工具变量检验均已通过，表明基准结果具有较强的稳健性和可信度。

表6 内生性检验结果

变量	GTFP		
	(1)	(2)	(3)
L.DIG	0.635***	0.569**	
	(0.207)	(0.241)	
IV			3.499***
			(0.772)
HC	−6.175	−11.60	30.413
	(10.800)	(10.74)	(18.810)
LGDP	−0.119	−0.088	−0.987**
	(0.244)	(0.251)	(0.397)
IS	2.016***	2.343***	5.491***
	(0.693)	(0.754)	(1.671)
OPEN	−0.304	−0.813	−2.766***
	(0.473)	(0.521)	(0.943)
ER	9.342*	15.170***	5.703
	(5.061)	(5.345)	(6.341)
Kleibergen-Paaprk LM statistic			6.089**
Kleibergen-Paap rk Wald F statistic			23.915 [16.380]
常数项	0.858	0.464	
	(2.164)	(2.243)	
样本数	165	154	176
R^2	0.440	0.448	0.036
Province FE	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes

注：方括号内为Stock-Yogo弱工具变量检验在10%水平上的临界值；圆括号内为标准误；***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著。

5 进一步分析

5.1 异质性分析

数字化转型对绿色全要素生产率的影响可能因区域特征差异而呈现异质性。为更为准确地识别这种差异，参考江鑫等[25]、陆灿等[26]的做法，从地理区位与经济发展水平两个维度对样本进行分组检验。

在地理区位划分方面，参考国家统计局区域划分标准，将样本地区划分为西南地区和西北地区。

其中，西南地区包括云南省、贵州省、四川省、重庆市；西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区。

在经济发展水平划分方面，依据样本期内各省份人均GDP水平进行排序，并以中位数为划分标准，将样本划分为经济发达地区和经济欠发达地区。其中，人均GDP高于中位数的地区划分为经济较发达地区，包括内蒙古自治区、重庆市、陕西省、四川省和宁夏回族自治区；低于中位数的地区划分为经济欠发达地区，包括甘肃省、青海省、新疆维吾尔自治区、贵州省、云南省和广西壮族自治区。

表7列(1)和列(2)的结果显示，数字化转型对西南地区煤炭产业绿色全要素生产率的促进作用在10%水平上显著，而在西北地区则在1%水平上显著。从估计系数与模型拟合度来看，西南地区的促进效应整体更为明显。这可能是由于西南地区在产业基础、技术吸收能力以及数字基础设施建设等方面相对更具优势，从而更有利于释放数字化转型的绿色效应。

从表7列(3)和列(4)的结果来看，数字化转型在经济发达地区对绿色全要素生产率具有显著正向促进作用，而在经济欠发达地区未通过显著性检验。这表明，数字化转型的绿色效应具有明显的条件依赖性，其作用的发挥受到地区经济发展水平、技术基础及要素禀赋等因素的约束。相较而言，经济发达地区在资本、人才及技术积累方面更具优势，数字化转型更易通过资源优化配置与技术创新实现绿色绩效提升；而经济欠发达地区由于数字基础设施相对薄弱、人才储备不足及转型成本较高，短期内难以充分释放数字化转型的绿色红利。

上述结果表明，数字化转型对绿色全要素生产率的促进作用具有显著的区域异质性特征。

表7　异质性分析结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	西南地区	西北地区	经济发达地区	经济欠发达地区
	GTFP	GTFP	GTFP	GTFP
DIG	0.146*	0.093***	0.094***	−0.023
	(0.074)	(0.043)	(0.035)	(0.020)
Controls	Yes	Yes	Yes	Yes
样本数	64	80	80	96
R^2	0.855	0.774	0.937	0.857
Province FE	Yes	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes	Yes

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

5.2　中介效应分析

前文实证结果表明，数字化转型显著促进了煤炭产业绿色全要素生产率的提升。基于此，为进一步探究该影响效应的内在传导路径与作用机制，将绿色全要素生产率进行分解，提取技术进步指数(TC)作为中介变量，并构建中介效应模型进行检验。

依据表8的回归结果，数字化转型显著推动了技术进步，而后者又持续正向作用于绿色全要素生产率，上述结果验证了数字化转型通过推动技术进步进而提升绿色全要素生产率的中介传导机制，假设H2得以成立。由此可见，数字化转型对煤炭产业绿色发展的赋能效应具有双重路径：一是直接效应，二是经由技术进步传导的间接效应；既直接提升绿色全要素生产率，也通过加速技术革新与落地，提升资源利用率、削减排放，间接强化绿色转型成效。

表8　中介效应回归结果

变量	(1)	(2)	(3)
	GTFP	TC	GTFP
DIG	0.820***	3.822***	0.561**
	(0.212)	(0.935)	(0.215)
TC			0.068***
			(0.018)
Controls	Yes	Yes	Yes
样本数	176	176	176
R^2	0.542	0.293	0.583
Province FE	Yes	Yes	Yes
Year FE	Yes	Yes	Yes

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

6　结论与启示

6.1　研究结论

选取西部地区11个省份(西藏除外)2009—2024年面板数据，实证分析了数字化转型对煤炭产业绿色全要素生产率的影响，并探讨了技术进步的中介机制与异质性表现，得到如下结论：①数字化转型显著提升了西部地区煤炭产业绿色全要素生产率，基准回归中DIG的系数在各种设定下均显著为正，说明数字技术的应用能够通过生产过程优化、管理效率提升和要素配置改善，有效促进煤炭产业绿色绩效提升。②异质性分析表明，数字化转型对绿色全要素生产率的促进效应因地区而异。西南地区及经济发达地区的促进作用更强，而经济欠发达地区的效果不明显。③中介机制检验分析得出技术进步是关键传导渠道。研究结果表明，数

字化转型对绿色效率的影响具有两方面的作用：一方面表现为直接效应，另一方面则通过促进技术进步而产生显著的间接正向效应。

6.2 政策启示

（1）应着力促进人工智能、大数据、物联网等数字技术与煤炭产业链上游关键生产环节的系统性融合，重点围绕智能开采、智能洗选、无人运输、数字孪生矿山建设等关键场景，加快数字技术在煤炭生产全流程中的应用。依托实时监测、智能调控与精准治理等数字化手段，协同提升资源利用效率并降低污染排放水平，为绿色全要素生产率的增长提供直接驱动力。

（2）推行因地制宜的差异化区域策略，弥合西部地区煤炭产业数字化转型过程中的数字鸿沟。西南地区及经济较发达省份应强化示范引领功能，加速成熟模式与经验的推广应用；西北及欠发达地区则需重点强化数字基础设施投入、技术服务配套与人才队伍建设，综合运用财税补贴、税收减免及定向扶持等手段，切实减轻企业转型成本与进入壁垒。

（3）积极完善数字化与绿色化协同的制度环境。应加快出台行业标准，建立兼顾数字化程度与绿色产出的评估体系，将绿色成果纳入考核奖励，形成明确的政策导向。将数字化转型的绿色成效纳入政策激励和绩效考核之中，以形成更加清晰的政策导向和制度保障。

综上所述，数字化转型已成为西部地区煤炭产业实现绿色高质量发展的新路径。未来应从技术赋能、区域统筹与制度建设多端发力，促使数字化红利充分转化为绿色全要素生产率的实际增长，在保障能源安全的前提下稳步推进绿色低碳转型。

参考文献

[1] 罗军. 数字化如何赋能制造业绿色发展[J]. 当代财经，2023(7)：108-120.

[2] 李青原，李昱，章尹赛楠，等. 企业数字化转型的信息溢出效应：基于供应链视角的经验证据[J]. 中国工业经济，2023(7)：142-159.

[3] 郭家堂. 公共数据开放与中国绿色全要素生产率：数据要素的视角[J]. 经济研究，2025，60(2)：56-72.

[4] 李金昌，连港慧，徐蔼婷. “双碳”愿景下企业绿色转型的破局之道：数字化驱动绿色化的实证研究[J]. 数量经济技术经济研究，2023，40(9)：27-49.

[5] 吴婧乙，赵红卫. 数字技术创新对企业绿色全要素生产率的影响：来自企业数字专利的证据[J]. 商业研究，2026(5)：1-12.

[6] 温雪，黄立军，杨海娟. 数字农业发展对农业绿色全要素生产率影响的实证检验：以西部地区为例[J]. 统计与决策，2026，42(1)：61-65.

[7] 苏甜甜，李翠霞. 数字经济对我国畜牧业绿色全要素生产率的影响研究[J]. 中国农业资源与区划，2026(5)：1-20.

[8] 刘文俊，彭慧. 区域制造企业数字化转型影响绿色全要素生产率的空间效应[J]. 经济地理，2023，43(6)：33-44.

[9] 吴安波，田雨露，孙林辉，等. 数智化对煤炭产业链供应链韧性的影响研究[J]. 煤炭经济研究，2026(4)：1-11.

[10] 陈素梅，赵健烽. 中国产业数字化对经济系统和总能耗的影响：基于能源效率视角的分析[J]. 生态文明研究，2025(6)：27-37.

[11] 蓝海燕，孙国帅，冯娇，等. 数字化、智能化、绿色化协同促进煤电产业新质生产力发展的实现路径[J]. 科技管理研究，2025(16)：196-205.

[12] 张志红，王露露，宋艺. 社会责任信息披露能否提升企业绿色全要素生产率？[J]. 审计与经济研究，2024(4)：103-115.

[13] DORAN J，RYAN G. The importance of the diverse drivers and types of environmental innovation for firm performance[J]. Business Strategy and the Environment，2016，25(2)：102-119.

[14] 李素梅，尚达. 银行ESG偏好与企业绿色转型：基于供应链关联溢出的新视角[J]. 金融监管研究，2025(1)：1-19.

[15] 温忠麟，叶宝娟. 中介效应分析：方法和模型发展[J]. 心理科学进展，2014，22(5)：731-745.

[16] 蔡林美，郭佐宁，张金锁. 中国煤炭行业绿色全要素生产率研究[J]. 中国矿业大学学报(社会科学版)，2023，25(1)：161-180.

[17] 吴非，胡慧芷，林慧妍，等. 企业数字化转型与资本市场表现：来自股票流动性的经验证据[J]. 管理世界，2021，37(7)：130-144.

[18] 曾辉祥，冉杭鑫，周琼. 数字赋能绿色发展：企业数字化的碳减排效应：基于中国A股上市公司的实证研究[J]. 吉首大学学报(社会科学版)，2024，45(3)：94-107.

[19] 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.

[20] 黎新伍，黎宁，谢云飞. 数字经济、制造业集聚与碳生产率[J]. 中南财经政法大学学报，2022(6)：131-145.

[21] 万攀兵，杨冕，陈林. 环境技术标准何以影响中国制造业绿色转型：基于技术改造的视角[J]. 中国工业经济，2021(9)：118-136.

[22] 孙勇，张思慧，赵腾宇，等. 数字技术创新对产业结构升级的影响及其空间效应：以长江经济带为例[J]. 软科学，2022，36(10)：9-16.

[23] 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.

[24] 屠西伟，张平淡. 数字化转型与企业碳边际减排成本[J]. 世界经济，2025，48(9)：146-175.
[25] 江鑫，胡文涛，许文立，等. 政府绿色采购如何激发企业绿色创新活力[J]. 数量经济技术经济研究，2024，41(11)：200-220.
[26] 陆灿，高慧，杨建林. 数据要素视角下智能鸿沟地区异质性形成机理框架构建[J]. 情报杂志，2026，45(1)：136-144.

Impact of Digital Transformation on Green Total Factor Productivity of Coal Industry in Western Regions

TAN Haihang, LIU Xiaoping
(School of Finance and Economics, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Driving the green transition of the coal industry in Western China is of paramount importance for harmonizing energy security with regional sustainable development. A panel dataset covering 11 western provincial-level administrative regions from 2009 to 2024 was utilized. The SBM-GML(slack-based measure-global Malmquist-Luenberger)model was employed to measure the green total factor productivity(GTFP) of the coal industry, and the impact of digital transformation along with its mechanisms was empirically assessed. It is found that digital transformation significantly enhances GTFP in the western coal industry, driving green and high-quality development through production-side technological empowerment, management-side synergy optimization, and factor-side allocation improvement. Through mechanism analysis, it is revealed that technological progress serves as the key mediating pathway through which digital transformation elevates GTFP. Through heterogeneity analysis, it is further indicated that this positive effect is more pronounced in southwestern regions and economically advanced provinces, while it remains insignificant in less developed areas constrained by digital infrastructure and talent shortages. Therefore, efforts should be made to strengthen technology integration, implement differentiated regional strategies, and improve collaborative institutions, thereby unlocking digital dividends and supporting the green development of the western coal industry under the framework of energy security.

Keywords: digital transformation; coal industry; green total factor productivity; Western China; technological progress