

数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的影响研究——兼论政府环境治理的调节作用

张新^{1,2} 齐志豪¹ 马良^{1,2} 王高山^{1,2}

(1. 山东财经大学 管理科学与工程学院, 山东济南 250014;

2. 山东财经大学 数字经济研究院, 山东济南 250014)

摘要 本文通过对 2011~2019 年 56 个黄河流域沿线城市的面板数据进行实证检验, 探讨了数字技术对生态效率的影响。研究发现: 数字技术对黄河流域沿线城市生态效率存在负向的“规模效应”和正向的“创新效应”的双重影响, 整体表现为一种先抑制后促进的“U”形效应, 并且这一效应具备明显的区位异质性特征。政府环境规制弱化了数字技术对生态效率的“U”形效应, 政府财政补贴强化了数字技术对生态效率的“U”形效应。

关键词 黄河流域, 数字技术, 生态效率, 政府环境治理

中图分类号 F49

1 引言

改革开放四十多年来, 中国经济高速增长, 取得了令世人惊叹的发展奇迹。但随着进入高质量发展阶段, 传统的人口、资源红利减少, 粗放型发展模式带来的资源、环境问题日益凸显, 且这种问题在黄河流域地区尤为严峻^[1]。国家统计局和水利部发布的数据显示, 2021 年, 我国黄河流域沿线九省区的地区生产总值约占全国 GDP 的 25.2%, 但所排放的 SO₂ 占全国的比重却高达 36.4%, 水资源开发利用率已达 80%, 远超 40% 的生态警戒线, 此外在沿线九省区中, 地区生产总值最高的山东省是最低的青海省的 24.5 倍。这些数据充分说明, 黄河流域虽是我国重要的生态安全屏障, 但当前却存在着过度开发、过度排放以及沿线地区发展不平衡不充分等问题^[2], 从而大大制约了沿黄流域经济的可持续发展。针对这一问题, 习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上指出, “黄河流域生态保护和高质量发展, 同京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展一样, 是重大国家战略”^①。可见, 黄河流域生态环境问题, 现已成为政府关注的重点, 而生态效率作为表征生态文明建设的重要指标, 其追求的以更少的资源和环境投入获得更高的经济产出的目标是解决这一问题的关键^[3]。

近年来, 数字经济已然成为继农业经济、工业经济之后新的经济社会发展形态^[4], 其引发的数字技术革新为黄河流域沿线城市生态效率的提高带来了新的发展机遇。政府在《黄河流域生态保护和高质量

* 基金项目: 国家社会科学基金重点项目“推动数字经济和实体经济深度融合研究”(21AZD022); 2023 年山东省高等学校优秀青年创新团队“黄河流域数字经济和实体经济深度融合的产业生态体系研究”(2023RW064); 山东省社会科学规划研究数字山东专项《数字技术赋能山东省中小企业数字化转型机理与动态演化路径研究》(24CSDJ43)。

通信作者: 马良, 山东财经大学管理科学与工程学院副教授、硕士生导师, E-mail: maliang1010@126.com。

① 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话, https://www.qstheory.cn/dukan/qs/2019-10/15/c_1125102357.htm。

发展规划纲要》文件中明确提出，“提高工业互联网、人工智能、大数据对传统产业渗透率，推动黄河流域优势制造业绿色化转型、智能化升级和数字化赋能”。但当前，关于数字技术是否切实提高了黄河流域沿线城市生态效率尚无定论，其内在的作用机制也有待于进一步探索。理论上，数字技术深入渗透企业的研发、生产、销售等各个环节，不仅能够实现业务流程优化、效率提升和价值创造方式的重塑^[5]，更重要的是，它能帮助企业战略决策者更清晰地识别与构建相应的社会责任议题，明确绿色发展目标，进而打破对传统技术的路径依赖，开展绿色创新活动^[6]，从而提升生态效率。但不可忽视的是，数字技术的自身发展不具备环境友好的特性，需要完善的信息基础设施作为底层支撑^[7]，而黄河流域整体基础条件相对薄弱且区域发展不均衡，因此在数字技术发展初期，可能带来资源消耗和污染排放的压力。此外，数字技术往往会加速市场需求与供给的精准匹配，导致订单量的急剧增长^[8]，但在企业尚未完成技术和工艺的绿色升级的情况下，产能的快速扩张可能带来能源消耗和污染排放的激增^[9]，从而对生态效率产生潜在的不利影响。

同时，由于环境问题的外部性特征，数字技术对黄河流域沿线城市生态效率作用的发挥可能具有明显的“制度依赖”^[10]。一方面，数字技术既可以用于扩大生产规模，也可以用于节能减排，其具体应用偏向在很大程度上受到环境规制强度的影响^[11]。但目前黄河流域的环境监管体系尚不健全，执行力度存在较大的区域差异。在某些环境规制力度较低的地区，当地企业可能会更注重数字技术带来的短期经济效益，而忽视其可能带来的环境成本；而在某些环境规制力度较强地区，尽管企业更倾向于利用数字技术优化能源利用效率和减少污染物排放，但过于严格的监管可能带来成本上升、技术改造压力加大等问题，甚至导致部分中小企业因无力承担环保投入而被迫退出市场。另一方面，数字技术作用的发挥需要庞大的前期投入，且面临较大的不确定性和较长的投资回报^[12]。而黄河流域部分城市经济发展水平较低，产业基础薄弱，企业在推动数字化与绿色化进程中往往面临资金短缺、技术投入不足等现实困境，亟须政府通过税收优惠等财政补贴政策，并结合健全的补贴资金审查机制，为企业提供必要的资金支持。

综上所述，数字技术对黄河流域沿线城市的生态效率具有赋能与负能的双重效应，势必要依靠政府“有形的手”的作用^[13]，构建绿色经济发展体系，实现提质增效与环境保护的“双赢”^[14]。在此背景下，从正向和负向的双重视角探索数字技术影响生态效率的内在机制，并在此基础上明确政府作为治理资源、环境问题的重要主体，应该如何制定适当的环境治理政策来充分发挥数字技术对生态效率的推动作用，对改善我国黄河流域生态环境，实现经济绿色增长具有重要意义。本文潜在的边际贡献主要体现在三个方面：①将数字技术对生态效率的影响分解为负向的“规模效应”和正向的“创新效应”，并基于动态视角，揭示伴随着数字技术自身水平的提高，其对生态效率影响效应的动态演化特征；②将政府环境治理细分为环境规制和财政补贴，探究不同类型的政府环境治理手段在数字技术影响生态效率过程中所发挥的调节作用是否存在明显差异，为政府环境治理政策的制定提供指导；③以 56 个黄河流域沿线城市为研究样本，从地理区位角度考察数字技术对生态效率影响效应的异质性特征，并据此提出相应政策建议。

2 文献综述

2.1 数字技术与生态效率

生态效率的概念最早由德国学者施拉格特（Schaltegger）提出，他将生态效率描述为经济增加值与产生的环境影响的比值^[15]。此后也有相关学者界定了生态效率的内涵，虽定义不尽相同，但普遍认为其

本质是以最低的资源和环境投入获得最大的经济效益产出^[16, 17]。伴随着资源环境问题的日益严重,生态效率在学界的研究热度进一步提高,相关文献主要集中于回答生态效率如何测算以及哪些是影响生态效率的重要因素。学者常采用的测算方法主要包括两类:一类是单一指标法^[18, 19],如可燃再生能源和废弃物占总能源使用的百分比;另一类是指标体系法,即在构建指标体系的基础上,利用因素分解^[3]、随机前沿分析^[20]或数据包络分析^[21]等方法测算各地区生态效率。此外,也有部分学者对影响生态效率的因素展开了分析,其中经济发展、产业结构、外商投资以及政府环境治理等因素普遍被认为对生态效率的提高具有重要的影响^[1, 22]。

除上述影响因素外,数字技术对生态效率的影响作用也受到了学界的广泛关注。但相关研究并未得出一致结论,部分学者认为,数字技术是指信息、计算、沟通和连接技术及其组合,具体包括人工智能、大数据、云计算和区块链等^[23],其不仅可以帮助企业建立完善的资源监控系统,实时了解自身资源消耗和污染排放情况^[24],还能帮助企业针对性实现技术升级,推动智能制造和自动化生产,优化生产流程,提升资源配置效率,减少环境污染^[25, 26]。但也有学者指出,数字技术对我国生态效率的推动效应具有一定的滞后性,需要数字技术本身的不断开发、运行和迭代升级,这一过程反而会加剧资源消耗和环境污染^[27],导致生态效率的下降。

由此可知,国内外学者对数字技术与生态效率之间的关系研究虽已展开,但多集中于探讨数字技术对生态效率是否存在促进或抑制的线性影响,鲜有学者同时从正向和负向的双重视角,考察数字技术生态效率之间的非线性关系机制。同时,既有文献多是利用全国、主要城市群以及长江经济带等层面的面板数据检验数字技术与生态效率之间的关系,针对黄河流域沿线城市的实证研究相对较少,忽视了黄河流域与其他区域在资源禀赋、经济基础以及人文环境等方面的差异性,特别是数字技术与生态效率之间的关系是否在黄河流域沿线城市存在地理区位等方面的异质性也有待进一步揭示。

2.2 政府环境治理

资源环境问题是一个典型的“外部性”问题,单纯依靠市场的力量并不能使问题得到很好的解决,政府环境治理在生态效率提高的过程中发挥了重要的作用^[14]。政府环境治理通常可以采用环境规制和财政补贴两种手段^[28]。其中关于环境规制对生态效率的影响,部分学者认为合理的环境规制可以倒逼企业增加绿色创新投入来激发“创新补偿”效应,使企业在提高经济绩效的同时,改进环境绩效,进而提高生态效率^[29]。也有学者认为环境规制并不能有效促进技术进步、提高生态效率,成本的增加反而会产生负向“遵循成本”效应^[30]。也有学者认为环境规制与生态效率之间并非简单的线性关系,而是一种“U”形或倒“U”形的曲线关系^[31, 32]。此外,还有学者认为不同类型的环境规制可以对生态效率产生不同的影响,如罗能生和王玉泽指出,环境规制具体可以分为“治理投入型”规制和“经济激励型”规制,其中“治理投入型”规制与生态效率之间存在“U”形关系,但“经济激励型”规制当前对绿色效率并无显著影响^[21]。关于财政补贴对生态效率的影响,现有观点也存在一定的分歧。部分学者认为财政补贴在生态效率提高的过程中所发挥的作用十分有限^[33, 34],但也有学者指出,政府财政环保支出可以通过促进技术进步有效提高生态效率^[35]。

既有文献主要集中于探讨数字技术与生态效率的关系以及政府环境治理与生态效率的关系,虽也有少量学者试图将数字技术、政府环境治理与生态效率三者纳入到同一分析框架开展研究,探讨在不同水平的政府环境治理下,数字技术对生态效率的影响差异,以为理论和实践提供更为丰富的成果和指导。遗憾的是,相关研究普遍忽略了政府环境治理手段的多样性特征,仅从环境规制的单一视角展开分析,而且并未达成统一。一方面,部分学者认为环境规制可以有效加强对企业环境治理的监管,确保企业将

数字技术切实应用于污染治理,而非盲目地扩大生产,从而避免企业的“搭便车”行为^[11],强化数字技术对区域生态效率的影响^[36,37]。另一方面,也有学者指出,虽然严格的环境规制能够更好地约束企业用能排污行为,但会导致企业治污投入的增加,挤占对数字技术的研发投入,削弱数字技术对区域生态效率的影响^[38]。此外,还有学者认为环境规制存在最优的力度区间,过弱或过强的环境规制都无法充分发挥数字技术的作用^[39]。

综上所述,尽管政府环境治理在区域生态效率提升过程中的重要作用引发了学术界的广泛关注,但相关学者多聚焦于回答政府环境治理对生态效率的直接影响,虽有少数文献从环境规制的角度探讨了政府环境治理在数字技术影响生态效率过程中的调节作用,但政府环境治理的手段并非只有拉动企业绿色需求的环境规制,还包括为企业绿色升级提供的财政补贴,当前不同类型的政府环境治理手段在数字技术影响生态效率过程中所发挥的调节作用是否存在差异性却较少探讨。

3 理论分析与研究假设

3.1 数字技术对生态效率的影响效应分析

数字技术在发展初期,对生态效率的影响主要以负向的“规模效应”为主。一方面,数字技术本身的发展不仅会造成庞大的电力消耗^[27],而且会引发数据量的爆发式增长,而数据的生成、加工与运输需要完善的信息基础设施作为底层支撑,基础设施的广泛建设也会进一步带来资源消耗和污染排放的压力^[40]。另一方面,数字技术通过电子商务平台等形式,可以改变传统的贸易模式,搭建消费者与供应商之间的直接交流渠道,帮助买卖双方有效降低信息的获取和甄别成本,实现过去由于地理距离、信息不对称等原因而无法达成的交易,企业可以吸引更多的潜在消费者,获得更大的市场规模^[41]。但在初期企业技术、工艺未能实现绿色升级的情况下,生产规模的迅速扩张会引致企业能源需求的急剧增加和污染排放的攀升^[9],造成生态效率的下降。

技术创新是在有限的生态环境容量和资源承载能力下提高生态效率,实现绿色发展的根本途径^[42]。当数字技术发展到一定规模后,可以从需求侧和供给侧发力,提高企业绿色技术创新水平,对生态效率产生正向的“创新效应”。从需求侧来看,在工业经济时代,企业的利润主要来自标准化、批量化生产所带来的规模报酬,消费者的个性化需求难以得到满足。数字经济时代,大数据、人工智能等数字技术的发展拉近了企业与消费者之间的距离,一方面消费者可以更加高效地搜寻最适合自己的商品,充分满足自己的个性化需求^[4];另一方面企业可以更加轻松地捕获消费者的需求信息,从而对自身产品服务做出针对性的改良升级,以获取长久的市场竞争优势。在这个过程中,消费者可以更好地表达自身的绿色化需求,倒逼企业将资源、环境成本纳入到生产成本中,拉动企业对绿色技术的需求^[7],提高生态效率。从供给侧来看,大数据、人工智能等数字技术可以帮助企业精准识别技术的创新方向,加速企业创新决策的制定,同时还有助于企业连接绿色研发、生产和销售等环节,强化自身协同能力,最终提高绿色技术创新水平^[43]。此外,绿色技术创新相比于普通的技术创新具有更强的外部性,外部利益的存在导致企业往往不会自发开展创新活动^[44]。而数字技术可以弱化工业经济时代各主体经济活动的边界性,将企业同其利益相关者联结在同一个网络中^[7],强化外部主体对创新企业的要素支持,确保创新活动的顺利开展。资金方面,数字经济时代兴起的数字金融可以依托数字技术,有效缓解信贷市场的信息不对称性,促进金融资源供给与企业需求之间的匹配,降低企业融资成本,提高企业融资速度^[45]。人才、科技方面,数字技术不仅可以强化企业之间的纵向、横向合作,加速人才要素的流动和知识技术的溢出^[7],还能有

效解决过去科研机构、高等院校与企业之间由于信息不对称性所造成的供需错配问题,帮助机构、高校实时了解企业全产业链条中绿色技术创新应用的动态结果和存在的问题,并提供相应的人才、技术支持,加快企业产品、服务的绿色化升级。基于上述分析,本文提出如下假设。

H1: 数字技术对生态效率同时存在负向“规模效应”和正向“创新效应”的双重影响机制,伴随着数字技术的发展,其对生态效率的影响会由“规模效应”主导转为“创新效应”主导,从而产生一种先抑制后促进的“U”形影响。

3.2 政府环境治理的调节效应分析

数字技术对生态效率的作用取决于“规模效应”和“创新效应”的综合影响。政府是环境治理的重要主体,通过采用环境规制、财政补贴等手段^[28],可以改变数字技术对生态效率的作用环境,从而在两者的关系之间发挥显著的调节作用,但这种调节作用可能会由于政府环境治理手段的不同而表现出明显的差异。

一方面,环境规制作为一种政府拉动企业绿色需求的环境治理手段,可能会削弱数字技术对生态效率的“U”形影响。在数字技术发展初期,政府通过采用征收排污费等方式的环境规制,可以使企业外部性的环境污染内部化^[32],迫使生产者将资源、环境成本纳入生产成本,从而引导企业经营模式由注重短期效益的低水平规模扩张转向注重可持续发展的质量扩张^[46],降低企业对环境产生的不利影响^[47]。这种情况下,政府的环境规制可能会削弱数字技术对生态效率的“规模效应”。而在数字技术发展到一定水平后,其对生态效率的“创新效应”逐渐凸显,此时政府环境规制虽能在一定程度上提高企业对于绿色技术的需求,倒逼企业开展绿色技术创新活动,加速实现企业产品、服务的绿色化升级^[48],但同时也增加了企业的环境治理成本,压缩了企业的利润空间^[30],当绿色创新带来的利润无法抵消资源环境成本时,可能会抑制企业绿色创新动力^[49],减少企业绿色创新投入。这种情况下,政府环境规制的加强可能会削弱数字技术对生态效率的“创新效应”。

另一方面,财政补贴作为一种政府为企业绿色转型升级提供要素支持的环境治理手段,可能会加强数字技术对生态效率的“U”形影响。在数字技术发展初期,由于存在信息不对称^[50],政府往往难以对投入的资金开展有效的监管,部分企业出于获取自身利益的动机,在获得政府补贴后并没有真正地用于实现绿色升级^[51,52],反而用于扩张线上和线下市场,以获得更大的规模报酬。这种情况下,政府财政补贴的提高可能会加强数字技术对生态效率的“规模效应”。但在数字技术发展到一定水平后,政府与企业之间的信息不对称性大大降低^[53],此时政府通过分析企业生产、排污的动态信息,实时监督企业对政府补贴的使用情况,可以确保企业将资金应用于产品、技术的绿色升级^[54],使有限的政府补贴发挥出最大的价值。同时,政府通过向企业提供财政补贴,还能向市场释放一种认可和支持的积极信号,以此帮助企业获取金融机构、科研机构以及高等院校等其他外部主体的信任^[55],有效缓解企业在开展绿色技术创新过程中所面临的资金约束和人才、技术短缺问题,提高企业绿色技术创新的动力和积极性^[52]。在这种情况下,政府的财政补贴可能会加强数字技术对生态效率的“创新效应”。基于此,本文提出 H2 和 H3。

H2: 政府环境规制能够削弱数字技术与生态效率之间的“U”形关系,即使“U”形曲线变得更加平缓。

H3: 政府财政补贴能够加强数字技术与生态效率之间的“U”形关系,即使“U”形曲线变得更加陡峭。

基于以上讨论,本文提出研究模型,具体如图 1 所示。

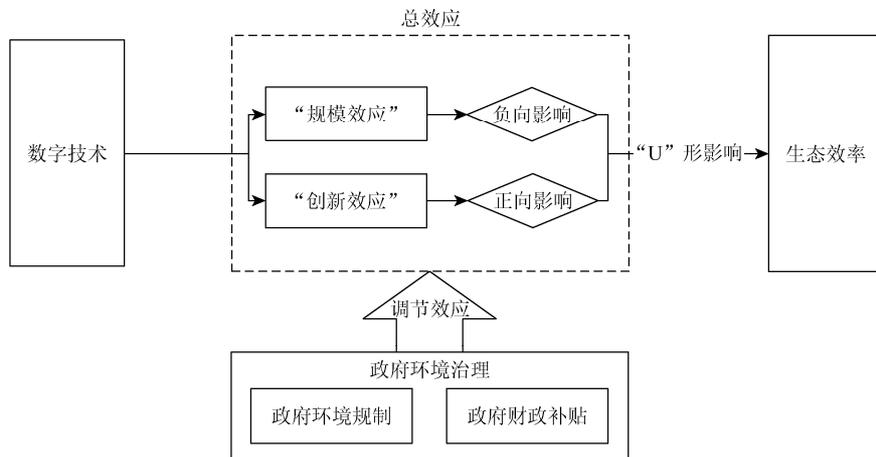


图1 研究框架

4 研究设计

4.1 变量测度

(1) 被解释变量：生态效率 (GREEN)。本文运用因素分解法测度生态效率^[3]，具体公式如下：

$$GREEN_{it} = [GENE_{it} \times GEVE_{it}]^{1/2} \quad (1)$$

其中， $GREEN_{it}$ 表示生态效率； $GENE_{it}$ 表示绿色能源效率； $GEVE_{it}$ 表示绿色环境效率。 $GENE_{it}$ 和 $GEVE_{it}$ 的计算公式分别为

$$GENE_{it} = S_{it} / C_{it} \quad (2)$$

$$GEVE_{it} = [S_{it} / P_{w,it} \times S_{it} / P_{g,it}]^{1/2} \quad (3)$$

其中， S_{it} 表示各地区的实际生产总值； C_{it} 表示各地区能源消耗总量，由于能源消耗总量数据无法直接获得，故将电力、液化石油气和天然气三类能源进行折标，计算各城市的能源消耗总量^[56]； $P_{w,it}$ 表示各地区工业废水排放量； $P_{g,it}$ 表示各地区工业 SO_2 排放量， i 表示地区， t 表示时间。

(2) 解释变量：数字技术发展水平 (DIG)。考虑到前期投入是数字技术发展的基础，而相关产出是数字技术价值的重要体现，因此本文参考刘婧玲和陈艳莹的研究，从投入和产出两个方面衡量数字技术发展水平^[57]，其中投入方面主要包括数字基础设施和数字要素投入，数字基础设施采用每百人互联网用户数和每百人移动电话用户数衡量，数字要素投入采用信息传输、计算机服务和软件业从业人员数占比衡量。产出方面包括数字技术产出和数字交易发展，数字技术产出采用人均电信业务量衡量，数字交易发展采用数字普惠金融指数衡量。所构建的指标体系如表 1 所示，在此基础上，利用熵权法求得各城市数字技术发展水平。

表 1 数字技术发展水平指标体系

一级指标	二级指标	指标解释及单位
数字技术发展水平	数字基础设施	每百人互联网用户数/户
		每百人移动电话用户数/户
	数字要素投入	信息传输、计算机服务和软件业从业人员数占比/%

续表

一级指标	二级指标	指标解释及单位
数字技术发展水平	数字技术产出	人均电信业务量/元
	数字交易发展	数字普惠金融指数

(3) 调节变量：政府环境治理水平。本文进一步将政府环境治理细分为环境规制和财政补贴两类。其中环境规制力度 (ER) 选取工业 SO₂ 去除率、工业烟粉尘去除率、工业固体废物综合利用率、污水集中处理率以及生活垃圾无害化处理率五个指标，利用熵权法综合衡量政府环境规制力度^[58]。财政补贴力度 (FIL) 采用各城市政府节能环保支出占地区生产总值的百分比进行测度^[34]。

(4) 控制变量：通过查阅既有文献^[2, 7, 59]，结合黄河流域的发展现实，本文总结了影响黄河流域生态效率的其他因素，并将其作为控制变量纳入到模型中，以确保实证结果的可靠性。主要包括：经济发展水平 (PGDP)，以实际人均地区生产总值进行测度，并进一步做对数化处理，以消除异方差对实证结果所产生的影响；产业结构水平 (TS)，以第三产业增加值与地区生产总值的比值进行测度；外商投资水平 (OPEN)，以实际使用外资金额与地区生产总值的比值进行测度；科技教育水平 (TEC)，以政府科学支出和教育支出的和与地区生产总值的比值进行测度；城镇化水平 (URB)，以城镇户籍人口与总户籍人口的比值进行测度。

4.2 模型设计

本文通过构建计量模型进行实证检验。针对 H1，设立的模型如式 (4) 所示：

$$\text{GREEN}_{it} = \beta_0 + \beta_1 \text{DIG}_{it} + \beta_2 \text{DIG}_{it}^2 + \beta X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

其中，GREEN_{it} 表示生态效率；DIG_{it} 表示数字技术发展水平；DIG_{it}² 表示数字技术发展水平的平方项；X_{it} 表示控制变量；μ_i 表示个体效应；ν_t 表示时间效应；ε_{it} 表示随机扰动项。

针对 H2 和 H3，本文通过构建非线性调节效应模型实证检验政府环境治理在数字技术与生态效率之间的调节作用^[60]，具体如式 (5) 所示。

$$\begin{aligned} \text{GREEN}_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \text{DIG}_{it} + \beta_2 \text{DIG}_{it}^2 + \beta_3 \text{MOD}_{it} + \beta_4 \text{DIG}_{it} \times \text{MOD}_{it} \\ & + \beta_5 \text{DIG}_{it}^2 \times \text{MOD}_{it} + \beta X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \end{aligned} \quad (5)$$

其中，MOD_{it} 表示调节变量，包括政府环境规制力度和政府财政补贴力度；DIG_{it} × MOD_{it} 表示经去中心化处理的数字技术发展水平与政府环境治理的交互项；DIG_{it}² × MOD_{it} 表示经去中心化处理的数字技术发展水平平方项与政府环境治理的交互项，其他变量同式 (4)。

4.3 样本选择与数据来源

黄河流域涉及山西、内蒙古、山东、河南、四川、陕西、甘肃、青海、宁夏 9 个省区的 66 个城市^[22]。基于数据的可获得性，本文选取了 2011~2019 年沿黄 9 省区中的 56 个城市作为研究样本。原始数据主要来自中国研究数据服务平台 (Chinese Research Data Services Platform, CNRDS) 数据库、EPS (economy prediction system, 经济预测系统) 全球统计数据/分析平台、《中国城市统计年鉴》以及各省市统计年鉴及财政局发布的数据，对于部分缺失值，采用插值法予以补齐。各变量的描述性分析见表 2。此外，为避免潜在的多重共线性问题，本文采用方差膨胀因子 (VIF) 进行检验，VIF 的最大值为 3.76，且平均 VIF 仅为 2.35，均小于 10 的临界值，由此推断变量间不存在严重的多重共线性问题。

表 2 变量描述性统计

变量	观测值	平均值	标准差	最小值	最大值
生态效率 (GREEN)	504	1.287	0.801	0.153	5.498
数字技术发展水平 (DIG)	504	0.185	0.089	0.020	0.750
环境规制力度 (ER)	504	0.771	0.126	0.302	0.986
财政补贴力度 (FIL)	504	0.837	0.710	0.084	5.493
经济发展水平 (PGDP)	504	10.350	0.600	8.773	12.271
产业结构水平 (TS)	504	0.410	0.105	0.181	0.687
外商投资水平 (OPEN)	504	0.012	0.016	0.000	0.198
科技教育水平 (TEC)	504	0.042	0.027	0.009	0.151
城镇化水平 (URB)	504	0.345	0.220	0.071	1.000

5 实证结果与分析

5.1 基准回归分析

表 3 汇报了数字技术影响黄河流域沿线城市生态效率的基准回归结果。模型 (1) 和模型 (3) 是未加入任何控制变量的固定效应模型和随机效应模型估计结果, 模型 (2) 和模型 (4) 是加入控制变量后固定效应模型和随机效应模型的估计结果。结果显示, 数字技术的一次项系数均为负, 二次项系数均为正。考虑到数据可能只存在一段单调凹的情况, 本文进一步使用 Utest 检验验证数字技术与生态效率之间的“U”形关系, 结果如表 4 所示。所有模型均拒绝了不存在“U”形关系的原假设, 且极值点均位于[0.020, 0.750]的置信区间内, 左端点斜率为负, 右端点斜率为正。这充分说明伴随着数字技术的发展, 黄河流域沿线城市的生态效率表现出了先下降后上升的“U”形趋势, 即数字技术与生态效率之间并不是简单的线性关系, 只有当数字技术的发展水平超过一定的阈值后才能正向提高黄河流域沿线城市的生态效率, H1 得到验证, 具体效应如图 2 所示。

表 3 基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	GREEN	GREEN	GREEN	GREEN
DIG	-2.254* (-1.688)	-2.704** (-2.137)	-2.820** (-2.285)	-4.100*** (-3.211)
DIG ²	3.672** (2.314)	4.437*** (2.971)	4.286*** (2.812)	5.679*** (3.681)
PGDP		1.413*** (7.432)		0.786*** (5.122)
TS		0.438 (0.645)		-0.039 (-0.067)
OPEN		3.852** (2.052)		3.722** (1.966)

续表

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	GREEN	GREEN	GREEN	GREEN
TEC		-8.375** (-2.127)		6.472** (2.029)
URB		0.191 (0.346)		-1.233*** (-3.662)
截距项	1.395*** (11.057)	-13.220*** (-6.353)	1.443*** (9.833)	-6.496*** (-3.934)
城市固定效应	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	504	504	504	504
R^2	0.185	0.317	0.185	0.251

注：()内是 T 统计量和 Z 统计量

***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著

表 4 Utest 结果

模型	极值点	斜率	T 值	整体 T 值
模型 (1)	0.307	临界下限: -2.110	临界下限: -1.651	$T=1.65[0.050]$
		临界上限: 3.253	临界上限: 2.589	
模型 (2)	0.305	临界下限: -2.530	临界下限: -2.088	$T=2.09[0.019]$
		临界上限: 3.951	临界上限: 3.374	
模型 (3)	0.329	临界下限: -2.652	临界下限: -2.248	$T=2.25[0.013]$
		临界上限: 3.608	临界上限: 2.893	
模型 (4)	0.361	临界下限: -3.877	临界下限: -3.176	$T=3.18[0.001]$
		临界上限: 4.418	临界上限: 3.590	

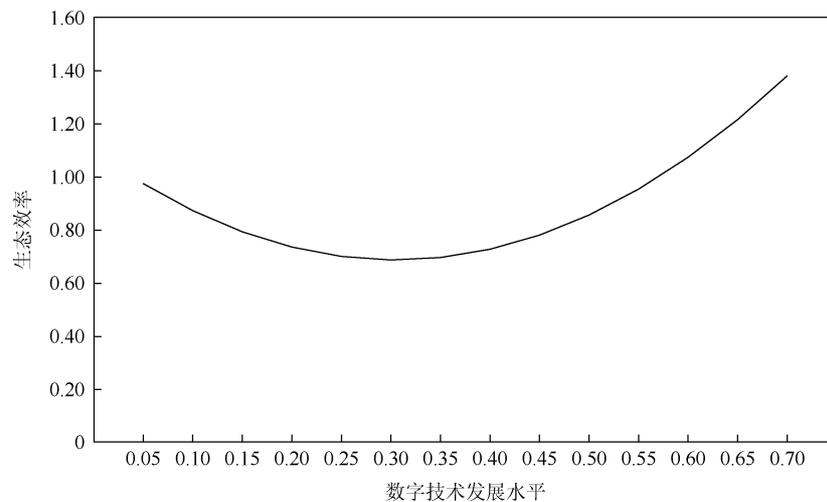
注: []内是 p 值

图 2 数字技术发展水平对生态效率的影响效应

针对最优模型的选择,本文进行了 Hausman 检验,检验结果在 1% 的显著性水平下拒绝了使用随机效应模型的原假设,故认为模型 (2) 拟合效果最优。通过观察模型 (2) 中控制变量的结果,发现经济发展水平和外商投资水平对生态效率均具有显著的正向推动作用。说明一方面,虽然相关学者指出区域经济的发展在短期可能引致资源浪费、环境污染等问题的加剧^[29],但长期有利于提高居民的环保意识,倒逼企业提升污染治理能力,提高生态效率^[22]。另一方面,尽管既有文献认为外商投资具有逐利本质,加之我国初期招商引资政策不完善,国外投资者转移到我国的产业通常具有高污染、高能耗的特点^[61]。但随着对外开放步伐加大和绿色发展理念的贯彻,经济决策部门在引进外资的过程中会更加注重外资的质量,为我国带来更为先进的发展理念以及更为高效的生产技术,并推动生态效率得到有效提升^[62]。产业结构水平和城镇化水平的影响效应并不明显,可能是由于第三产业中所包含的行业较为广泛,既有科技含量高、溢出效应强的高科技生产型服务业,也有技术附加值低,生产模式粗放的传统服务业^[63],仅仅是第三产业中传统服务业的经济比重提高,并不能从根本上改变黄河流域沿线城市高消耗、高污染的发展模式。同时,由于黄河流域本身生态环境承载力较为脆弱,并且部分沿线城市的城镇化模式仍以粗放的土地扩张型为主,而非集约化、智慧化发展^[4],使得城镇化尽管为这些城市带来大量的劳动资源,但却并未能形成完善的基础设施支持和高效的治理体系,反而加剧了城市污染排放和资源消耗^[7]。科技教育水平对生态效率的影响效应显著为负,这可能暴露出当前我国黄河流域沿线城市的经济发展模式仍旧相对粗放的问题,导致当年新增的人才要素更多地被吸纳到了高能耗、高污染的产业中,对科研的投入也更多应用于发展提高生产效率的生产技术,而非降低污染强度的绿色技术,因此并不能真正地提高生态效率^[29, 64]。

5.2 内生性问题和稳健性检验

为确保实证结果的可靠性,本文进一步对内生性和稳健性问题展开讨论。

本文采用了多种稳健性检验方法,具体包括:

(1) 替换被解释变量。通过查阅相关文献,本文构建了如表 5 所示的指标体系^[22]。采用包含非期望产出的超效率松弛变量法 (super-slacks-based measure, Super-SBM) 模型对各城市的生态效率进行重新测度 (记为 $GREEN_1$), 并替换原被解释变量进行回归, 结果见表 6 模型 (1)。发现数字技术对生态效率仍具有明显的“U”形影响, 故实证结果具有稳健性。

表 5 生态效率指标体系

类别	指标及单位
投入	年末单位从业人员数 (万人)
	固定资本存量 (亿元)
	城市建设用地面积 (平方公里)
	能源消耗总量 (万吨标准煤)
期望产出	地区生产总值 (亿元)
非期望产出	工业废水排放量 (万吨)
	工业 SO ₂ 排放量 (吨)

(2) 替换核心解释变量。在原有数字技术发展水平指标体系的基础上, 本文采用主成分分析法计算

权重, 获得新的数字技术发展水平得分 (记为 DIG_1), 并替换原核心解释变量进行回归, 结果见表 6 模型 (2)。发现数字技术对生态效率的“U”形影响仍旧显著, 故实证结果具有稳健性。

表 6 稳健性检验结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	GREEN ₁	GREEN	GREEN	GREEN	GREEN	GREEN
L.GREEN					0.639*** (68.385)	0.739*** (78.928)
DIG	-0.930* (-1.843)		-3.436** (-2.542)	-2.951** (-2.367)	-1.203*** (-5.147)	-1.148*** (-3.633)
DIG ²	1.317** (2.212)		6.778*** (3.254)	4.530*** (3.083)	2.459*** (6.323)	1.786*** (4.056)
DIG ₁		-1.501*** (-2.600)				
DIG _i		0.905*** (3.452)				
PGDP	0.536*** (7.065)	1.504*** (7.769)	1.480*** (8.232)	1.410*** (7.503)	0.773*** (26.694)	0.172*** (4.531)
TS	0.138 (0.511)	0.683 (0.992)	0.863 (1.411)	0.028 (0.042)	-0.007 (-0.052)	0.251** (2.557)
OPEN	1.043 (1.394)	4.047** (2.157)	8.215*** (2.898)	3.939** (2.133)	1.103*** (7.942)	0.807 (1.228)
TEC	-3.644** (-2.322)	-7.831** (-1.991)	-7.295* (-1.939)	-8.764** (-2.261)	-1.467 (-1.281)	2.967*** (3.624)
URB	0.143 (0.648)	0.099 (0.178)	-0.006 (-0.013)	0.100 (0.183)	-0.253* (-1.894)	-0.081 (-1.011)
ER				1.023*** (4.031)		
FIL				0.031 (0.559)		
截距项	-4.871*** (-5.872)	-14.096*** (-6.713)	-14.065*** (-7.140)	-13.681*** (-6.637)	-7.146*** (-20.820)	-1.462*** (-3.796)
城市固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	504	504	504	504	392	448
R ²	0.361	0.320	0.372	0.342		
AR(1)_P					0.003	0.003
AR(2)_P					0.714	0.566
Sargan_P					0.999	1.000

注: ()内是 T 统计量和 Z 统计量

***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著

(3) 缩尾处理。为排除异常值对结果的影响, 本文进行了 1% 水平的双边缩尾处理, 重新回归后结果见表 6 模型 (3)。发现数字技术的一阶滞后项对生态效率的一次项系数仍显著为负, 二次项系数仍显著为正, 故验证了实证结果的稳健性。

(4) 引入新控制变量。考虑到政府环境治理也能直接对生态效率产生影响, 本文进一步将政府环境

规制力度和财政补贴力度也纳入到模型中进行回归,结果见表6模型(4)。发现数字技术的一次项系数为负,二次项系数为正,且分别通过了5%水平的显著性检验,由此可得研究结果具有良好的稳健性。

为克服模型的内生性问题,同时考虑到生态效率的提高具有一定的惯性^[65],本文进一步将被解释变量的一阶滞后项纳入到模型中,构建动态面板模型,并以核心解释变量的滞后项作为工具变量,利用差分广义矩估计模型和系统广义矩估计进行回归,具体模型见式(6)。

$$\text{GREEN}_{it} = \alpha_0 + \beta_1 \text{GREEN}_{i(t-1)} + \beta_2 \text{DE}_{it} + \beta_3 \text{DE}_{it}^2 + \beta X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \quad (6)$$

其中, $\text{GREEN}_{i(t-1)}$ 表示生态效率的一阶滞后项,其他变量同式(4)。回归结果见表6模型(5)和模型(6)。发现生态效率的一阶滞后项系数显著大于0,反映出生态效率的提高具有一定的惯性,且 Arellano-Bond 检验表明随机扰动项存在一阶自相关,不存在二阶自相关, Sargan 检验表明所选取的工具变量是有效的,由此可知模型设定合理。进一步观察数字技术发展水平的影响系数,发现其一次项系数显著小于0,二次项系数显著大于0,与原结果相同。这说明在充分考虑内生性问题的情况下,数字技术对生态效率的影响作用依旧表现为先抑制后促进的正“U”形。

5.3 异质性和时间趋势分析

受经济、历史以及地形等因素的影响,不同区域数字技术对生态效率的影响效应可能存在差异。因此,本文进一步采用分组回归的方法,考察数字技术对黄河流域沿线城市生态效率影响效应的异质性特征。具体来说,首先本文按地理分布将黄河流域沿线城市细分为上游城市、中游城市和下游城市^[22],分别采用个体时间双固定效应模型进行拟合,结果见表7模型(1)至模型(3)。发现在中游城市,数字技术对生态效率具有显著的“U”形影响,但在上游城市和下游城市,数字技术的一次项系数和二次项系数均不显著,说明当前数字技术的影响效应在中游城市更为明显。究其原因,本文认为黄河流域下游地区发展起步较早,数字技术发展水平和生态效率明显优于中上游地区,但伴随着数字技术发展“红利”效应的消耗殆尽,东部地区数字技术对生态效率的影响效应可能会表现出一种边际效应递减的趋势^[4,41]。上中游地区虽发展起步晚,却存在着更大的发展空间,因此数字技术对生态效率的改善作用在上中游地区表现得更为明显,但上游地区基础设施建设相对落后,无法为数字技术的发展提供良好的底层支持作用,这可能会削弱数字技术对生态效率的影响作用。

表7 异质性结果

变量	(1)	(2)	(3)
	上游城市	中游城市	下游城市
	GREEN	GREEN	GREEN
DIG	-1.654 (-0.688)	-1.870 (-1.175)	0.887 (0.265)
DIG ²	2.654 (0.901)	3.351* (1.836)	-0.281 (-0.057)
PGDP	0.400 (1.244)	3.443*** (6.785)	2.041*** (5.564)
TS	-0.225 (-0.192)	2.524* (1.853)	3.358** (2.467)
OPEN	6.224 (0.897)	10.984** (2.561)	1.854 (1.093)
TEC	-2.967 (-0.469)	-0.093 (-0.013)	-0.671 (-0.050)
URB	-0.786 (-0.272)	0.075 (0.099)	0.467 (0.609)

续表

变量	(1)	(2)	(3)
	上游城市	中游城市	下游城市
	GREEN	GREEN	GREEN
截距项	-2.100 (-0.576)	-35.727*** (-6.222)	-21.720*** (-5.542)
城市固定效应	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES
观测值	180	189	135
R^2	0.096	0.623	0.551

注: ()内是 T 统计量和 Z 统计量

***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著

为进一步刻画数字技术对黄河流域沿线城市生态效率影响的动态特征, 本文参考李晓钟和李俊雨^[66]的做法, 以 2011 年为基期, 在模型中只加入数字技术的一次项和数字技术与每一年份的交叉项, 利用个体时间固定效应模型进行估计, 结果见表 8。发现基期数字技术的影响系数显著为负, 即 2011 年总体来看, 数字技术抑制了黄河流域沿线城市生态效率的提高, 处于“U”形曲线拐点的左侧。观察数字技术与年份的交互项, 发现自 2012 年起, 交叉项系数均为正数, 且系数与显著性水平整体呈逐年上升态势, 到 2015 年, 数字技术与年份的交叉项的绝对值超过了基期系数绝对值, 即此时数字技术开始促进黄河流域沿线城市生态效率, 处于“U”形曲线拐点的右侧, 整体结果与前文分析相一致。

表 8 时间趋势分析结果

变量	GREEN	变量	GREEN
DIG	-3.729*** (-2.858)	TS	0.775 (1.142)
DIG × Year ₂₀₁₂	1.082 (0.815)	OPEN	3.839** (2.077)
DIG × Year ₂₀₁₃	1.881 (1.538)	TEC	-6.951* (-1.759)
DIG × Year ₂₀₁₄	3.648*** (2.877)	URB	-0.013 (-0.023)
DIG × Year ₂₀₁₅	4.022*** (3.145)	截距项	-14.789*** (-7.019)
DIG × Year ₂₀₁₆	4.500*** (3.481)	城市固定效应	YES
		年份固定效应	YES
DIG × Year ₂₀₁₇	4.009*** (3.116)	观测值	504
		R^2	0.348
DIG × Year ₂₀₁₈	3.995*** (3.230)		
DIG × Year ₂₀₁₉	4.734*** (3.843)		
PGDP	1.569*** (8.119)		

注: ()内是 T 统计量和 Z 统计量

***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著

5.4 调节效应分析

本文参考 Hanns 等的方法^[60], 检验政府环境治理在数字技术与黄河流域沿线城市生态效率之间的调节作用。表 9 中的模型 (1) 和模型 (2) 展示了政府环境规制和政府财政补贴对数字技术与生态效率的调节作用的回归结果。可以看出, 在模型 (1) 中, 数字技术平方项与政府环境规制的交互项系数显著为负, 说明政府环境规制使原来的“U”形曲线变得更为平缓, 即政府环境规制弱化了数字技术与黄河流域沿线城市生态效率的“U”形关系, H2 得到验证, 具体如图 3 所示。在模型 (2) 中, 数字技术平方项与政府财政补贴的交互项系数显著为正, 故政府财政补贴使原来的“U”形曲线变得更为陡峭, 即政府财政补贴加强了数字技术与黄河流域沿线城市生态效率的“U”形关系, H3 得到验证, 具体如图 4 所示。

表 9 调节效应回归结果

变量	(1)	(2)
	GREEN	GREEN
DIG	-2.212* (-1.741)	-1.758 (-1.380)
DIG ²	3.362** (2.063)	3.343** (2.223)
DIG×ER	15.822*** (3.494)	
DIG ² ×ER	-16.314** (-2.019)	
ER	1.121*** (4.482)	
DIG×FIL		-3.700*** (-4.058)
DIG ² ×FIL		7.752*** (3.650)
FIL		0.040 (0.711)
PGDP	1.457*** (7.687)	1.427*** (7.491)
TS	0.307 (0.454)	0.102 (0.149)
OPEN	3.207* (1.761)	3.472* (1.875)
TEC	-7.499* (-1.960)	-7.992** (-2.061)
URB	0.093 (0.174)	0.192 (0.349)
截距项	-14.500*** (-6.959)	-13.394*** (-6.413)
城市固定效应	YES	YES
年份固定效应	YES	YES
观测值	504	504
R ²	0.368	0.343

注: ()内是 *T* 统计量和 *Z* 统计量

***、**、* 分别表示在 1%、5%、10% 水平下显著

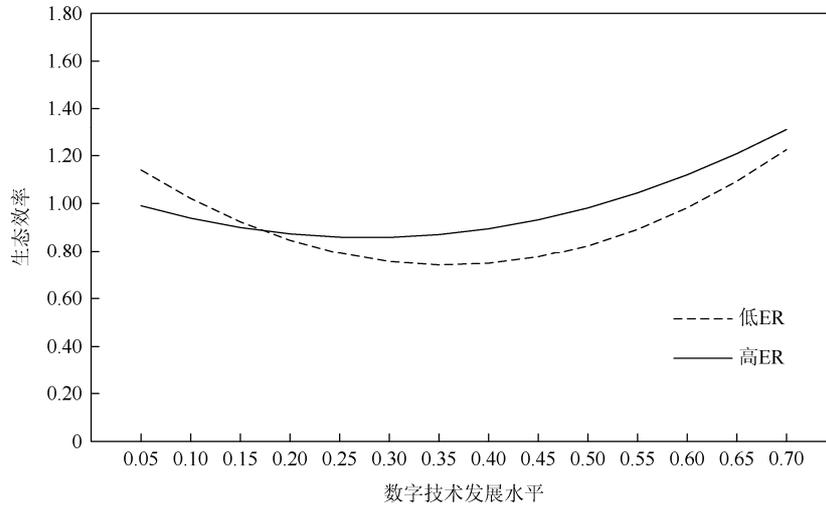


图 3 环境规制的调节作用
ER 指环境规制力度

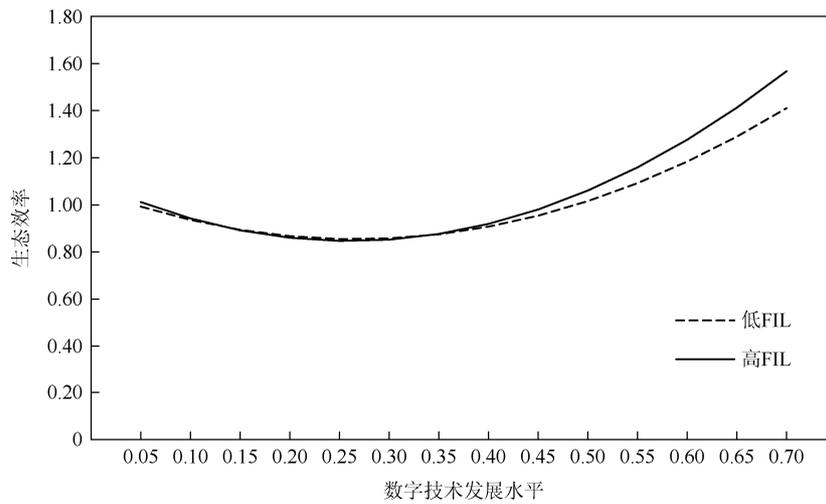


图 4 财政补贴的调节作用
FIL 指财政补贴力度

5.5 机制分析

实证结果显示，当前数字技术对黄河流域沿线城市生态效率具有先抑制后促进的“U”形影响。理论分析指出这主要取决于负向“规模效应”和正向“创新效应”的双重影响。为证实其中的内在机制，本文进一步构建中介效应模型进行实证检验^[67]，具体如式（7）和式（8）所示。MED_{it}是中介变量，包括规模效应和创新效应。其中，规模效应采用市场规模水平（SIZE）衡量，具体参考宣烨的方法，采用城市的总就业人口的对数值进行测度^[68]。创新效应采用绿色创新水平（INO）衡量，具体参考的邵帅方法，采用绿色专利授权数进行测度^[69]。其他变量同式（4）。

$$MED_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 DIG_{it} + \alpha X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \tag{7}$$

$$GREEN_{it} = \eta_0 + \eta_1 DIG_{it} + \eta_2 DIG_{it}^2 + \eta_3 MED_{it} + \eta X_{it} + \mu_i + \nu_t + \varepsilon_{it} \tag{8}$$

结果见表 10。在模型（2）和模型（3）中，数字技术发展水平对市场规模水平和绿色创新水平的影响系数显著为正，而模型（4）在加入市场规模水平和绿色创新水平后，数字技术发展水平的一次项系数和二次项系数不显著，市场规模系数显著为负，绿色创新的系数显著为正。由此可知数字技术可以显著提高黄河流域沿线城市的市场规模水平和绿色创新水平，但市场规模的扩大对生态效率的提高具有负向的影响，而绿色创新可以显著提高生态效率，内在机制得到验证。

表 10 中介效应回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	GREEN	SIZE	INO	GREEN
DIG	-2.704** (-2.137)	0.229* (1.815)	1.923*** (7.799)	-1.630 (-1.285)
DIG ²	4.437*** (2.971)			2.467 (1.550)
SIZE				-0.802*** (-4.550)
INO				0.340*** (3.428)
PGDP	1.413*** (7.432)	0.207*** (4.136)	0.295*** (3.016)	1.461*** (7.655)
TS	0.438 (0.645)	-0.114 (-0.640)	-0.394 (-1.137)	0.365 (0.556)
OPEN	3.852** (2.052)	-0.277 (-0.560)	0.579 (0.601)	3.236* (1.777)
TEC	-8.375** (-2.127)	-0.474 (-0.456)	1.485 (0.733)	-9.426** (-2.471)
URB	0.191 (0.346)	-0.001 (-0.006)	1.280*** (4.520)	-0.175 (-0.321)
截距项	-13.220*** (-6.353)	1.240** (2.258)	-3.508*** (-3.275)	-10.946*** (-5.313)
城市固定效应	YES	YES	YES	YES
年份固定效应	YES	YES	YES	YES
观测值	504	504	504	504
R ²	0.317	0.421	0.357	0.364

注：()内是 T 统计量和 Z 统计量

***、**、*分别表示在 1%、5%、10%水平下显著

6 研究结论与启示

6.1 研究结论

本文将数字技术、政府环境治理与生态效率纳入同一分析框架，首先从理论上分析了数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的影响机制，以及政府环境治理在二者之间的调节作用。然后基于 2011~2019 年 56 个黄河流域沿线城市的面板数据，采用多种计量模型进行实证检验。研究发现：

(1) 数字技术对黄河流域沿线城市生态效率存在正向“创新效应”和负向“规模效应”的双重影响,伴随着数字技术的发展,其影响效应由“规模效应”主导转为“创新效应”主导,从而产生一种先抑制后促进的“U”形影响。目前我国黄河流域地区整体处于“U”形曲线拐点的右侧。已有研究多集中于从促进要素配置优化、推动产业结构升级、降低交易成本等机制回答数字技术如何提高生态效率^[10, 39, 57]。也有学者指出,数字技术的发展存在高能耗问题^[27],可能对生态效率产生潜在的负面影响。但既有研究多是针对二者之间正负线性关系的考察,鲜有学者同时从双重视角探究数字技术与生态效率之间的非线性关系。基于此,本文将数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的影响机制分解为正向“创新效应”和负向“规模效应”,并考察了两种影响机制在数字技术发展水平不同阶段的动态演化特征,所得结论旨在深刻揭示数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的复杂影响。

(2) 政府环境治理在数字技术与黄河流域沿线城市生态效率之间发挥了显著的调节作用,但不同类型的政府环境治理手段所发挥的调节作用存在较大的区别。其中政府环境规制弱化了数字技术与黄河流域沿线城市生态效率的“U”形关系,政府财政补贴加强了数字技术与黄河流域沿线城市生态效率的“U”形关系。既有研究主要集中于回答数字技术与生态效率的关系以及政府环境治理与生态效率的关系^[27, 32],虽有少量学者尝试将三者纳入到同一分析框架,但所得结论并未达成一致^[11, 38, 39]。造成结果差异的一个潜在原因是相关研究集中于从政府环境规制的单一视角展开分析,而忽视了政府环境治理手段的多样性特征。因此,本文另辟蹊径,将政府环境治理细分为环境规制和财政补贴,并进一步通过探讨不同政府环境治理手段在数字技术与黄河流域沿线城市生态效率之间的调节效应的差异来填补研究空白,研究结论有助于为政府环境治理政策的制定提供更为明确的指导。

(3) 黄河流域地区数字技术对生态效率的影响存在典型的区位异质性特征。在中游城市,数字技术对生态效率具有显著的“U”形影响,但在上游城市和下游城市,数字技术的影响作用并不明显。已有研究主要集中在探究全国、长三角城市群、长江流域数字技术对生态效率的影响^[5, 27, 34, 70],而关于黄河流域地区数字技术对生态效率的研究还较少。此外,黄河流域面积 79.5 万平方公里,横跨 9 个省区,且不同地区之间地理环境与经济发展水平存在较大差异^[22, 71]。在此背景下,数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的影响是否因地理区位不同而存在显著差异也值得进一步探讨,本文的研究结果验证了这种区位异质性特征的存在,这一结论有助于深化对数字技术与黄河流域沿线城市生态效率之间内在关系的认识。

6.2 管理启示

针对上述研究结果,可以得到如下政策建议:

(1) 大力发展数字技术。数字技术对生态效率的影响并非简单的线性关系,只有当数字技术的发展水平超过一定的阈值后才能正向推动生态效率的提升。因此,政府未来一方面应对从事数字产品制造、信息技术服务行业的企业提供更高的支持力度,推动数字产业化发展水平,另一方面应加快推进数字技术在传统高能耗、高污染制造行业的深度应用,促进产业的数字化转型,以此提高黄河流域沿线城市的生态效率。

(2) 制定适当的环境治理政策。环境规制和财政补贴是政府治理生态问题的强有力的手段,其中政府环境规制可以弱化数字技术对生态效率的“U”形影响,政府财政补贴可以强化数字技术对生态效率的“U”形影响。因此,在数字技术发展初期,政府要重点使用环境规制政策,以此拉动企业开展绿色转型的积极性,削弱数字技术的“规模效应”;在数字技术发展到一定水平后,政府要重点使用财政补贴政策,并加强资金监管,确保资金的规范、高效利用,以此强化数字技术的“创新效应”,提高黄河流域沿线城市的生态效率。

(3) 加快推进“东数西算”工程建设。为充分发挥黄河流域上中下游地区数字技术对生态效率的改善作用,政府应因地制宜,深入落实“东数西算”战略,推动数据中心的合理布局、优化供需及互联互通,依靠下游地区的市场优势拉动上中游地区的发展需求,利用上中游地区的资源优势降低下游地区的发展成本,以此缩小数字鸿沟,推动不同区域数字技术的协同联动发展。

6.3 研究局限

本文也存在一定的局限性,本文主要基于56个黄河流域沿线城市数据进行了实证研究,研究结果是否适用于其他地区有待于进一步验证,未来可针对其他地区进行研究并对比差异。此外,本文主要探讨了当前数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的影响效应,以及政府如何制定环境治理政策来充分发挥数字技术对黄河流域沿线城市生态效率的推动作用,但环境问题的改善同样离不开消费者、金融机构等主体的共同努力,未来研究可进一步从消费者等视角考察如何强化数字技术对生态效率的影响。

参 考 文 献

- [1] 林江彪,王亚娟,张小红,等.黄河流域城市资源环境效率时空特征及影响因素[J].自然资源学报,2021,(1): 208-222.
- [2] 陈明华,岳海璐,郝云飞,等.黄河流域生态效率的空间差异、动态演进及驱动因素[J].数量经济技术经济研究,2021,(9): 25-44.
- [3] 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): 1-8,30.
- [4] 梁琦,肖素萍,李梦欣.数字经济发展提升了城市生态效率吗?:基于产业结构升级视角[J].经济问题探索,2021,(6): 82-92.
- [5] 田时中,王鹏霖.财政环保支出、数字技术与区域污染治理:基于长三角样本的考察[J].财经论丛(浙江财经大学学报),2025,(6): 40-51.
- [6] 张涵钰,张文韬,李涛.数字技术应用对企业环境绩效的影响研究:来自A股上市公司的经验证据[J].宏观经济研究,2023,(5): 67-84.
- [7] 庞瑞芝,王宏鸣.数字经济与城市绿色发展:赋能还是负能?[J].科学学研究,2024,42(7): 1397-1408.
- [8] 薛飞,刘家旗,付雅梅.人工智能技术对碳排放的影响[J].科技进步与对策,2022,39(24): 1-9.
- [9] 邵帅,张可,豆建民.经济集聚的节能减排效应:理论与中国经验[J].管理世界,2019,35(1): 36-60,226.
- [10] 包彤.数字技术赋能制造业结构双重优化:效益提升与绿色转型[J].南方经济,2023,(12): 83-106.
- [11] 韩冬日,吕晓丽,董会忠,等.数字技术对降碳减污协同增效的门槛效应[J].资源科学,2023,45(11): 2130-2143.
- [12] 王开科,吴国兵,章贵军.数字经济发展改善了生产效率吗[J].经济学家,2020,(10): 24-34.
- [13] 韦东明,顾乃华,刘育杰.雾霾治理、地方政府行为和绿色经济高质量发展:来自中国县域的证据[J].经济科学,2022,(4): 64-77.
- [14] 王锋正,郭晓川.政府治理、环境管制与绿色工艺创新[J].财经研究,2016,42(9): 30-40.
- [15] Schaltegger S, Sturm A. Ökologische rationalität: Ansatzpunkte zur ausgestaltung von ökologieorientierten managementinstrumenten[J]. Die Unternehmung, 1990, 4: 273-290.
- [16] Stigson B. Eco-efficiency: creating more value with less impact[R]. Conches-Geneva: WBCSD, 2000.
- [17] Zhang B, Bi J, Fan Z Y, et al. Eco-efficiency analysis of industrial system in China: a data envelopment analysis approach[J]. Ecological Economics, 2008, 68(1/2): 306-316.
- [18] Aldieri L, Bruno B, Vinci C P. Does environmental innovation make us happy? An empirical investigation[J]. Socio-Economic Planning Sciences, 2019, 67: 166-172.
- [19] 黄雪琴,王婷婷.资源型城市生态效率评价[J].科研管理,2015,36(7): 70-78.
- [20] 邢贞成,王济干,张婕.中国区域全要素生态效率及其影响因素研究[J].中国人口·资源与环境,2018,28(7): 119-126.

- [21] 罗能生, 王玉泽. 财政分权、环境规制与区域生态效率: 基于动态空间杜宾模型的实证研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(4): 110-118.
- [22] 岳立, 薛丹. 黄河流域沿线城市绿色发展效率时空演变及其影响因素[J]. 资源科学, 2020, 42(12): 2274-2284.
- [23] 黄勃, 李海彤, 刘俊岐, 等. 数字技术创新与中国企业高质量发展: 来自企业数字专利的证据[J]. 经济研究, 2023, 58(3): 97-115.
- [24] Li L Q, Boussemart J P, Shen Z Y, et al. Assessing the potential of digital technology: an integrated measurement of economic, environmental, and social performance[J]. *Annals of Operations Research*, 2025: 1-31.
- [25] Lai A L, Li Z R, Hu X R, et al. Does digital economy improve city-level eco-efficiency in China? [J]. *Economic Analysis and Policy*, 2024, 81: 1198-1213.
- [26] Xiao Y F, Duan Y J, Zhou H Y, et al. Has digital technology innovation improved urban total factor energy efficiency?-Evidence from 282 prefecture-level cities in China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 378: 124784.
- [27] Li X, Yue S J. Blessing or curse? The role of digital technology innovation in carbon emission efficiency[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 365: 121579.
- [28] 李新安. 环境规制、政府补贴与区域绿色技术创新[J]. 经济经纬, 2021, 38(3): 14-23.
- [29] 陈明华, 王山, 刘文斐. 黄河流域生态效率及其提升路径: 基于 100 个城市的实证研究[J]. 中国人口科学, 2020, (4): 46-58, 127.
- [30] 张虎平, 关山, 王海东. 中国区域生态效率的差异及影响因素[J]. 经济经纬, 2017, 34(6): 1-6.
- [31] 何宜庆, 吴铮波, 陈睿. 制造业产业转移、环境规制对城镇化扩张的生态效率影响[J]. 统计与决策, 2019, 35(7): 145-148.
- [32] 邵慰, 金泽斌, 陈子琦. 环境规制对区域生态效率的空间效应研究: 基于财政分权的调节作用[J]. 财经论丛, 2023, (6): 103-112.
- [33] 顾程亮, 李宗尧, 成祥东. 财政节能环保投入对区域生态效率影响的实证检验[J]. 统计与决策, 2016, (19): 109-113.
- [34] 盛皓炜, 王如忠. 数字经济对工业生态效率的影响: 基于长三角城市群的实证分析[J]. 财经论丛, 2023, (9): 3-13.
- [35] 姜智强, 刘伊霖, 曾智, 等. 财政环保支出对农业生态效率的影响研究: 来自长江经济带发展战略的经验证据[J]. 经济问题, 2022, (6): 113-122.
- [36] 李楠博. 数字经济有效赋能城市低碳发展了吗?: 来自低碳技术进步的解釋[J]. 东北师大学报(哲学社会科学版), 2023, (6): 71-82.
- [37] 王庆喜, 胡安, 辛月季. 数字经济能促进绿色发展吗?: 基于节能、减排、增效机制的实证检验[J]. 商业经济与管理, 2022, (11): 44-59.
- [38] 李江龙, 杨秀汪, 郭小叶. 数字经济发展赋能城市绿色经济绩效: 来自中国 282 个城市的经验证据[J]. 厦门大学学报(哲学社会科学版), 2023, 73(4): 30-41.
- [39] 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.
- [40] 高维龙, 彭影, 胡续楠. “双碳”目标下数字经济对城市节能减排的影响研究[J]. 城市问题, 2023, (3): 25-37.
- [41] 王军, 王杰, 王叶薇. 数字金融发展如何影响制造业碳强度? [J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(7): 1-11.
- [42] 韩晶, 陈曦, 冯晓虎. 数字经济赋能绿色发展的现实挑战与路径选择[J]. 改革, 2022, (9): 11-23.
- [43] 史丹, 孙光林. 数字经济和实体经济融合对绿色创新的影响[J]. 改革, 2023, (2): 1-13.
- [44] 李平. 论绿色技术创新主体系统[J]. 科学学研究, 2005, 23(3): 414-418.
- [45] 董香书, 王晋梅, 肖翔. 数字经济如何影响制造业企业技术创新: 基于“数字鸿沟”的视角[J]. 经济学家, 2022, (11): 62-73.
- [46] 刘帅, 程瑜, 刘天琦. 环境规制提升了工业产能利用率吗?: 基于经济增长竞争的调节效应分析[J]. 商业研究, 2023, (5): 12-19.
- [47] 张铂晨, 赵树宽. 政府补贴对企业绿色创新的影响研究: 政治关联和环境规制的调节作用[J]. 科研管理, 2022, 43(11): 154-162.
- [48] Porter M E, van der Linde C. Green and competitive: ending the stalemate[J]. *Harvard Business Review*, 1995, 73(5): 120-134.

- [49] Zhao X, Sun B W. The influence of Chinese environmental regulation on corporation innovation and competitiveness[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 1528-1536.
- [50] 李青原, 肖泽华. 异质性环境规制工具与企业绿色创新激励: 来自上市企业绿色专利的证据[J]. *经济研究*, 2020, 55(9): 192-208.
- [51] 刘津汝, 曾先峰, 曾倩. 环境规制与政府创新补贴对企业绿色产品创新的影响[J]. *经济与管理研究*, 2019, 40(6): 106-118.
- [52] 王永贵, 李霞. 促进还是抑制: 政府研发补助对企业绿色创新绩效的影响[J]. *中国工业经济*, 2023, (2): 131-149.
- [53] 李治国, 王杰. 数字经济发展、数据要素配置与制造业生产率提升[J]. *经济学家*, 2021, (10): 41-50.
- [54] 朱于珂, 高红贵, 丁奇男, 等. 地方环境目标约束强度对企业绿色创新质量的影响: 基于数字经济的调节效应[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(5): 106-119.
- [55] Wu A H. The signal effect of government R&D subsidies in China: does ownership matter?[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2017, 117: 339-345.
- [56] 罗良文, 张郑秋, 周倩. 产业智能化与城市低碳经济转型[J]. *经济管理*, 2023, 45(5): 43-60.
- [57] 刘婧玲, 陈艳莹. 数字技术发展、时空动态效应与区域碳排放[J]. *科学学研究*, 2023, 41(5): 841-853.
- [58] 何芳, 胡意翕. 环境规制对城市可持续发展效率的非线性影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(5): 84-95.
- [59] 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, 1637.
- [60] Haans R F J, Pieters C, He Z L. Thinking about U: theorizing and testing U-and inverted U-shaped relationships in strategy research[J]. *Strategic Management Journal*, 2016, 37(7): 1177-1195.
- [61] 李繁荣, 尚云舟, 薛紫玥. 外商直接投资对我国绿色发展的影响: 基于中国 260 个地级市的数据验证[J]. *经济问题*, 2022, (4): 75-84.
- [62] 岳立, 曹雨暄, 任婉瑜. 外商直接投资、异质型创新与绿色发展效率[J]. *国际经贸探索*, 2022, 38(3): 68-81.
- [63] 肖挺, 刘华. 产业结构调整与节能减排问题的实证研究[J]. *经济学家*, 2014, (9): 58-68.
- [64] 贺丹, 唐娅华, 胡绪华. 绿色服务产业政策对中国低碳经济增长的影响[J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 730-743.
- [65] 韩永辉, 黄亮雄, 王贤彬. 产业结构优化升级改进生态效率了吗? [J]. *数量经济技术经济研究*, 2016, 33(4): 40-59.
- [66] 李晓钟, 李俊雨. 数字经济发展对城乡收入差距的影响研究[J]. *农业技术经济*, 2022, (2): 77-93.
- [67] 宋德勇, 赵菲菲. 环境规制、资本深化对劳动生产率的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(7): 159-167.
- [68] 宣烨. 本地市场规模、交易成本与生产性服务业集聚[J]. *财贸经济*, 2013, (8): 117-128.
- [69] 邵帅, 葛力铭, 朱佳玲. 人与自然何以和谐共生: 地理要素视角下的环境规制与环境福利绩效[J]. *管理世界*, 2024, 40(8): 119-146.
- [70] Luo K, Liu Y B, Chen P F, et al. Assessing the impact of digital economy on green development efficiency in the Yangtze River Economic Belt[J]. *Energy Economics*, 2022, 112: 106127.
- [71] 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.

Research on the Impact of the Digital Technology on the Eco-efficiency of Cities along the Yellow River Basin: The Moderating Role of Government Environmental Governance

ZHANG Xin^{1,2}, QI Zhihao¹, MA Liang^{1,2}, WANG Gaoshan^{1,2}

(1. School of Management Science and Engineering, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China; 2. Digital Economy Research Institute, Shandong University of Finance and Economics, Jinan 250014, China)

Abstract Through empirical testing of panel data of 56 cities along the Yellow River from 2011 to 2019, this study

explores the impact of the digital technology on eco-efficiency. It is found that the digital technology has a negative 'scale effect' and a positive 'innovation effect' on the eco-efficiency of cities along the Yellow River Basin. Overall, it shows a U-shaped effect of first inhibiting and then promoting, and this effect has obvious characteristics of regional heterogeneity. Government environmental regulation weakens the U-shaped effect of the digital technology on eco-efficiency, while government financial subsidies strengthen the U-shaped effect of the digital technology on eco-efficiency.

Key words Yellow River Basin, Digital technology, Eco-efficiency, Government environmental governance

作者简介

张新(1967—),男,山东财经大学管理科学与工程学院教授、博士生导师,研究方向为数字经济、信息管理与信息系统, E-mail: zhangxin3506@126.com。

齐志豪(1996—),男,山东财经大学管理科学与工程学院博士研究生,研究方向为数字经济、生态效率, E-mail: qizh hao0801@163.com。

马良(1991—),男,山东财经大学管理科学与工程学院副教授、硕士生导师,研究方向为数字经济、社交媒体, E-mail: maliang1010@126.com。

王高山(1977—),男,山东财经大学管理科学与工程学院教授、博士生导师,研究方向为数字经济, E-mail: wgs6107@126.com。