

数字生态文明建设中制度创新的力量： 政策协同赋能的视角

韩先锋， 勾亚楠， 肖远飞， 李勃昕

[摘要] 加快建设绿色智慧的数字生态文明,是国家推动“美丽中国”和“数字中国”双重战略的关键举措。本文在构建城市数字生态文明指数的基础上,以低碳城市试点和“宽带中国”战略构造双边政策协同赋能的准自然实验,基于中国2011—2021年282个地级市面板数据及双重机器学习模型,考察绿色数字政策助力数字生态文明建设的协同机制及多维效应。结果发现:①绿色数字政策对数字生态文明建设具有明显的协同共促效应,且相较于单一政策,复合政策的赋能效果更为明显,以上结论在一系列稳健性和内生性检验后依旧成立。②绿色数字政策不仅能直接实现数字生态文明建设的“绿色—数字”双轮制度创新驱动,还可以通过经济结构优化、数字环境培育和生态保护引导等渠道间接助力数字生态文明建设。③对于经济基础较好和财政分权水平较低、数字产业发展和产业数字应用较低、非资源型和老工业基地城市,以及采取“先绿色后数字”组合政策的城市,绿色数字政策协同赋能数字生态文明的积极效果更为突出。④中国现阶段数字生态文明整体水平还不高,尚具有较大的提升空间,且城市间的数字生态文明差距呈现扩大趋势,而绿色数字政策不仅是协同推动数字生态文明建设的重要动力,也是有效助推数字生态文明发展跨越“马太效应”陷阱的决定因素。本文研究为新发展格局下政府加强“绿色—数字”政策协调配合、深度挖掘多维政策统筹合力、科学加快推进绿色智慧的数字生态文明建设提供了重要启示。

[关键词] 绿色数字政策; 协同推进; 数字生态文明; 双重机器学习

[中图分类号] F124 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2024)11-0062-19

一、引言

在2023年全国生态环境保护大会上,习近平总书记从党和国家事业发展全局的战略高度提出

[收稿日期] 2024-04-23

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目“‘两高’制造业数智化转型赋能绿色创新:机制探索、经验辨识与政策启示”(批准号72473059);教育部人文社会科学研究规划基金项目“数智化赋能制造业绿色转型的机理与政策研究”(批准号23YJA790026);云南省应用基础研究重点项目“数据资产定价理论及方法研究”(批准号202401AS070112)。

[作者简介] 韩先锋,昆明理工大学管理与经济学院特聘教授,经济学博士;勾亚楠,昆明理工大学管理与经济学院硕士研究生;肖远飞,昆明理工大学管理与经济学院教授,经济学博士;李勃昕,西安财经大学经济学院副教授,经济学博士。通讯作者:韩先锋,电子邮箱:hanxianfeng2008@163.com。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,文责自负。

要建设绿色智慧的数字生态文明。《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》《数字中国建设整体布局规划》，从“美丽中国”和“数字中国”双重国家战略层面强调应加快数字生态文明建设。美丽中国战略要求深化人工智能等数字技术应用，构建美丽中国数字化治理体系，建设绿色智慧的数字生态文明。数字中国战略则进一步明确了数字生态文明建设目标，提出到2025年数字生态文明建设取得积极进展，到2035年生态文明建设数字化发展更加协调充分。不难发现，国家层面已将数字生态文明建设提升至前所未有的战略高度，数字生态文明受到社会各界的广泛关注。然而，数字生态文明建设还处于起步阶段，尚面临经济绿色低碳转型艰难、生态环境信息流通不畅、绿色数字技术创新能力不足等一系列现实难题。这种情况下，政府政策工具箱中与之直接相关的绿色数字试点政策就为加快数字生态文明建设提供了一种新的解决思路。遗憾的是，几乎未有研究基于宏观角度关注国家层面的绿色数字政策协同创新究竟会给数字生态文明建设带来何种冲击。其中，以低碳城市建设为代表的绿色政策和以“宽带中国”战略为代表的数字政策是政府为推动绿色化、数字化发展而开展的两项特色鲜明、关联度高的绿色数字政策，二者能否协同推进数字生态文明建设尚不可知。那么，以低碳城市建设为代表的绿色政策和以“宽带中国”战略为代表的数字政策能否协同驱动数字生态文明建设？如果答案是肯定的，是通过何种途径赋能数字生态文明？绿色数字政策的协同效应又存在哪些异质性特征？厘清上述问题，对于未来国家统筹发挥绿色数字政策叠加效能、有效加快建设绿色智慧的数字生态文明具有重要的理论和现实意义。

目前，关于数字生态文明的相关研究才刚刚起步，少数文献侧重于分析数字生态文明建设的内在逻辑(刘国菊,2023)，以及探讨数字生态文明制度化的重要性(施志源和景池,2024)，尚未有研究对数字生态文明进行量化分析。与本文相关的一类文献侧重于割裂式考察单一绿色政策或数字政策对生态文明建设中环境改善的局部影响。一方面，部分学者肯定了绿色政策对环境改善具有重要影响。葛力铭等(2024)认为，低碳城市政策能显著地提升环境福利绩效。郑石明和尤朝春(2023)发现，低碳城市建设显著地降低了空气污染水平。Chen and Wang(2022)实证表明，低碳城市建设可明显地提高当地及邻近城市绿色效率。另一方面，已有文献发现了数字政策对环境改善的积极作用。郭丰等(2023)发现，“宽带中国”政策显著降低了城市碳排放。Feng et al.(2023)指出，“宽带中国”政策对城市绿色创新有积极影响，尤其是在东部地区和高等级城市，这种积极作用更为明显。He et al.(2024)利用企业污染数据研究显示，“宽带中国”战略的实施可以减少企业污染物排放，从而提高企业环境绩效。总体看，已有研究虽然为本文分析提供了重要借鉴，但是从制度创新协同视角评估绿色数字政策赋能的研究“凤毛麟角”，仅个别文献讨论了低碳城市建设和“宽带中国”战略协同驱动的减污效应(郭秋秋和马晓钰,2023)和降碳效应(闫华飞等,2023)，尚未有研究关注绿色数字政策能否促进数字生态文明建设这一重要话题。

相较于以往研究，本文的边际贡献在于：①尝试构建数字生态文明评价指标体系。本文首次构建数字生态文明指标体系，并测度各地级市层面的数字生态文明建设水平，在一定程度上拓展了数字生态文明的研究边界。②系统构建“经济—技术—生态”三位一体的绿色数字政策协同赋能理论框架。本文从直接、间接和异质性影响等多维度出发，创新性地将低碳城市建设和“宽带中国”战略为代表的绿色数字政策视为一次复合型准自然实验，系统评估绿色数字政策协同对城市数字生态文明的影响机制及效应，从制度协同创新的新视角为加快推动数字生态文明建设提供了理论启示和决策参考。③采用双重机器学习这一前沿计量模型进行经验刻画。相较于当前政策效果研究普遍采用双重差分模型，本文使用双重机器学习模型，能够在一定程度上避免控制变量冗余和模型误设问题，提高了绿色数字政策协同赋能研究结果的精确性和可信度。

二、政策背景与研究假说

1. 政策背景

低碳城市作为低碳经济“试验田”,是实现“生态—经济”协同发展的实践载体。2010年,国家发展和改革委员会印发《关于开展低碳省区和低碳城市试点工作的通知》,“自上而下”指定五省八市作为首批低碳试点城市,后续分别于2012年、2017年“自下而上”开展第二、三批低碳试点,全国共81个省、市、区县纳入试点范围,在“积累工作经验”“发挥比较优势”“总结发展经验”目标下积极探索低碳经济发展的潜在路径,可以为数字生态文明建设创造优越的绿色转型条件。另外,以网络基础设施建设为主要内容的“数字新基建”是新时代推动数字化转型的重要抓手。2013年,国务院发布《“宽带中国”战略实施方案》,提出宽带应用深度融入生产生活、移动互联网全面普及的发展目标。为此,工业和信息化部进一步出台《创建“宽带中国”示范城市(城市群)工作管理办法》明确开展“宽带中国”示范城市(城市群)工作,并分别于2014年开始连续3年推出三批具有良好宽带发展基础的试点城市(城市群),分阶段落实加快宽带网络优化升级、推进区域宽带网络协调发展等重点任务,为数字生态文明建设提供了坚实的数字基础支撑。进一步,以低碳城市试点为代表的绿色政策和以“宽带中国”战略为代表的数字政策并非毫无关联,而是相互联系、不可分割的有机绿色数字政策系统,如《国家低碳城市试点工作进展评估报告》和《中国宽带发展白皮书(2022年)》指出,随着数字化和绿色化不断融合发展,节能降耗技术加速应用推广,各试点城市应重点聚焦绿色低碳先进适用技术,促使政策红利向数绿融合倾斜,这都为低碳城市试点和“宽带中国”战略协同赋能绿色化、数字化融合发展提供了新的思路和要求。因此,低碳城市和“宽带中国”战略为本文研究绿色数字政策协同促进数字生态文明建设提供了一项难得的准自然实验。

2. 研究假说

生态文明源自人类改造物质世界过程中对人与自然关系的深化认识,是反映人与自然和谐程度的一种文明形态(张高丽,2013)。随着新一代信息技术在生态保护与环境治理领域中的广泛渗透,高效化、精准化、协同化和数字化逐步成为生态文明建设的主旋律,由此催生出数字生态文明这种全新的生态文明形态。一般认为,数字生态文明是依托数字技术赋能实现人与自然和谐共生的过程,其本质在于充分利用各领域数据,为生态文明建设过程中的风险监测预警、形势研判等提供可靠依据(赵世新,2023)。不难发现,主流观点通常将数字生态文明简单界定为以数字化或数字技术赋能生态文明建设的过程,而普遍忽略了数字生态文明建设中数字化、生态化是一个相互联系和不可分割的有机整体。习近平生态文明思想为准确把握数字生态文明的内涵和外延提供了重要思路,强调要坚持系统观念,抓住主要矛盾和矛盾的主要方面,对突出生态环境问题采取有力措施。本文以习近平生态文明思想为指引,结合系统观理论,从数字生态文明的整体性出发,统筹考虑系统内各要素、各层级和各方面,认为数字生态文明是数字时代以人与自然和谐共生现代化为宗旨,以通过深化人工智能等数字技术应用构建美丽中国数字化治理体系为本质特征,依托数字化引领生态化和生态化带动数字化,建设经济现代化、技术数字化和生态绿色化协同发展的绿色智慧文明系统和特有文明新形态。进一步,系统观视角下,数字生态文明建设具有夯实数字生态文明基础条件、增强数字生态文明技术支撑、提升数字生态文明建设成效和完善数字生态文明建设保障的四重外延特征,即包括数字生态文明基础条件的数字基础和生态基础等内容,涵盖数字生态文明技术支撑的数字技术、绿色技术和数字绿色技术等范围,涉及数字生态文明建设成效的数字转型、绿色转型和数绿融合发

展等领域,考量数字生态文明建设保障的重视程度和保护力度。数字生态文明正是在数字化和生态化相互融合发展下产生的一种绿色智慧的高级生态文明形态,既是传统生态文明的“升级版”,也是数字时代生态文明发展到一定程度的必然产物。

绿色数字政策赋能数字生态文明,能够全面提升数字生态文明建设的整体性、系统性和协同性。实际上,低碳城市试点和“宽带中国”战略的政策目的在于转变经济发展方式,建立健全绿色低碳循环发展经济体系,这既是建设现代化强国的必然选择和现实需要,也是建设数字生态文明的重要任务和长远目标。理论上,绿色数字政策协同有助于推动数字生态文明建设,具体表现为:一方面,低碳城市建设围绕经济社会发展绿色化、低碳化这一主要目标,面向低碳技术应用、碳排放精准管理、设备智能化升级等具体环节,对数字技术、网络设施和平台应用提出更高要求,从而实现生态化牵引数字化升级;另一方面,“宽带中国”战略以数字技术为生产力,以数据资源为关键要素,以信息网络为重要载体,在生产运行和生活服务过程中实现资源最优利用,助力节能减污降碳,由此实现数字化赋能生态化发展。因此,无论是经济现代化发展的远景目标,还是数字化应用的广度和深度,抑或是“人地和谐”的绿色发展要求,都应成为加快数字生态文明建设的重要驱动力。鉴于此,本文基于数字生态文明的内涵界定,构建“经济—技术—生态”的主线脉络阐释复合政策协同赋能的内在机制^①,认为绿色数字政策协同不仅能为数字生态文明建设注入直接动能,还可通过经济结构优化、数字环境培育和生态保护引导等传导渠道为数字生态文明建设提供间接支持,且这种积极影响在不同经济、技术和生态情景下存在一定的异质性。

(1)绿色数字政策协同赋能数字生态文明建设的基本机制。①绿色数字政策协同有助于推动数字生态文明建设的经济现代化进程。低碳城市试点致力于推行低碳生产方式和绿色消费模式,驱动生产力绿色转型,催生出新技术、新产业和新市场,推动绿色低碳循环的城市经济体系建设,由此助力经济现代化形成。此外,“宽带中国”战略能从推进区域宽带网络协调发展和数字基础设施建设方面弥补低碳城市政策功能缺失,其带来的数字技术推广应用有力地改变了传统信息获取方式,打破了生态文明和经济子系统间的信息不对称(张淑惠和孙燕芳,2023),从而为数字生态文明的经济现代化提供数字驱动力。②绿色数字政策协同有助于强化数字生态文明建设的技术数字化支撑。基于波特假说理论,低碳城市建设作为一项环境规制政策会产生创新补偿效应(Porter and Linde, 1995),即低碳城市建设所带来的额外成本会倒逼企业加大研发投入,积极开展绿色技术创新,从而提升企业生产率并获得经济收益,这能对数字生态文明的技术数字化进程产生积极影响。另外,“宽带中国”战略凭借其高渗透性、信息连通性和生态正外部性,既能快速建立“构建底图—数据清单—区域识别—措施筛选—清单优化”全流程的减污降碳扩绿协同技术方法,也可以赋予数字生态文明鲜明的技术数字化特色。③绿色数字政策协同有助于深化数字生态文明建设的生态绿色化内核。低碳城市既加快推进低碳建筑、低碳交通体系建设,大力推广新能源汽车使用,实现生活方式的绿色革命,又通过碳排放税、排污权交易市场等方式约束企业碳排放行为,推动生产方式绿色转型。同时,“宽带中国”战略可以为智能能源管理和环境监测提供政策支撑,开放性、交互性和实时性的互联网能够通过减少信息不对称、提高环境污染治理效率(Wu et al., 2021),与低碳试点政策形成优势互补,确保同向发力,无形中夯实了数字生态文明建设的绿色基底。

事实上,绿色数字政策协同城市通常具备更好的数字生态文明建设基础。①政策协同城市能结合本地区经济基础、技术条件和生态环境等实际情况,不断探索适合本地数字化和生态化协调发

^① 研究框架参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

展的模式及路径,并加快利用数字技术建立以绿色低碳为特征的产业体系和生活方式,快速实现网络化、绿色化、智能化和集约化,助力数字生态文明的经济现代化发展。②政策协同城市更有可能实现数字生态文明建设过程中数字化与生态化的深度融合发展。一方面,政策协同城市着力提升绿色数字技术的供给能力,畅通技术转化路径,提升转化应用水平,建立健全以市场为导向的绿色数字技术创新体系,从而推动数字生态文明建设中数字化与绿色化的相互融合;另一方面,政策协同城市可实现统筹布局绿色智能的多层次算力设施体系,通过加强数据中心顶层设计、建设完善的一体化算力服务,构建互通共享的数据基础设施,以加快实现数字生态文明建设的数绿融合发展。③政策协同城市能更充分发挥绿色数字政策赋能的聚合效应。低碳城市是建设数字生态文明的试验场,能为数字生态文明建设的数绿融合发展提供重要载体,而“宽带中国”战略可通过打通生态文明建设信息“大动脉”这一关键载体,为数字生态文明建设筑牢互联互通的数字底座,二者均能从不同维度共同为数字生态文明建设提供助力。基于此,本文提出:

H1:绿色数字政策可以协同推动数字生态文明建设。

(2)绿色数字政策协同赋能数字生态文明的传导机制。绿色数字政策协同不同于传统单一政策,其通常要求在经济、技术和生态等领域实现全方位数字化和绿色化协同发展,切实为数字生态文明建设添薪续力。鉴于此,本文从经济结构优化、数字环境培育、生态保护引导三个维度剖析绿色数字政策协同推动数字生态文明建设的内在传导逻辑。

经济结构优化机制。绿色数字政策协同有利于优化经济结构,主要表现在促进要素配置和推动产业结构高级化。一方面,绿色数字政策协同促进互联网迅速普及发展,有助于降低要素市场信息不对称性,加速竞争有序的要​​素市场形成,实现地区间要素供给和需求的有效配置,由此改善要素配置扭曲、提高资源配置效率(白俊红等,2022)。此外,基于有限理性人假说,绿色数字政策协同能够强化企业对自身要素配置效率低下的认知,引导要素流向绿色数字化产业,为企业提高要素配置效率提供可行的改进方案。另一方面,绿色数字政策协同有利于优化产业中间环节,聚焦培育支持节能环保、数字经济等新兴产业,从而推动产业结构高级化发展。一般而言,政策协同城市通常具备良好的网络基础设施建设,能以其强大的泛在连接能力,持续优化传统产业生产方式、业务流程和中间环节,有力推动了产业转型升级。同时,政策协同城市能提供更为坚实的产业政策和财税支持,有效引导城市产业聚焦节能低碳和数字绿色类产业,使之日益成为推动产业结构高级化的重要载体(余硕等,2020)。进一步,经济结构优化是劳动与资本密集型产业向知识与技术密集型产业转变的演进过程,在数字时代,这不仅实现了绿色技术数字化升级,也促进了传统产业的数字化、绿色化转型发展。另外,经济结构优化往往会使得环境友好型企业的价格管制放松和融资成本降低,无形中可诱发企业加大研发资金投入,推动“数字—绿色”新型复合技术研发,为实现节能减排提供可靠的技术支撑,从而对数字生态文明建设产生积极影响。由此可见,绿色数字政策能从促进要素配置和推动产业结构高级化两方面优化经济结构,进而协同赋能数字生态文明建设。

数字环境培育机制。绿色数字政策协同有利于培育数字环境,主要表现在培育数字技术环境和数字创业环境。一方面,绿色数字政策协同城市在推动数字技术环境培育上更具优势。一般而言,政策协同城市具备更完善的数字基础设施,可快速为数字技术发展搭建先进的网络技术开发平台,据此提供更加可靠的数据支撑和安全保障。同时,政策协同城市的政府往往会为研发节能环保和低耗能技术增加环保支出,以推动科研进展(郭进,2019),由此,既会引发财政小资本撬动社会大资本流入,也能诱发企业持续增强环保、数字领域投资,持续开发出更多符合市场需求的绿色数字技术,从而为数字技术环境培育打下坚实的资本支持和技术基础。另一方面,绿色数字政策协同城市能更

加充分地吸引高技能创业人才流入,提高城市创业活跃度,从而有利于培育市场驱动的数字创业环境。同时,政策协同城市具备的高水平数字基础设施更易于推动数字化水平提升,这既能为数字创业者提供必要的技术支持,又可为新创企业创造巨大的潜在市场和用户基础,从而有利于吸引高技能人才落地创业(焦豪等,2023)。此外,在绿色数字政策协同引导下,社会资源会逐步向智能制造、高端服务业等低耗能、低污染产业倾斜,能不断提升企业家数字创业意愿,提高城市数字创业活跃度。进一步,数字环境培育为数字技术赋能数字生态文明建设提供了良好的环境条件,有助于形成绿色智慧的生产方式和生活方式。具体表现为:数字环境培育既有助于推动数字技术向传统产业渗透,助力传统产业数字化、生态化转型,也能在倡导绿色低碳生活方式方面发挥积极作用,把推进数字生态文明建设转化为全体人民日常生活中的自觉行动。另外,数字环境培育还可为加快构建智慧高效的生态环境信息化体系和环境治理数字化平台打造坚实基础,由此为污染防治、生态保护与环境修复提供技术支持和智慧方案,进而推动数字生态文明建设。综上,绿色数字政策能通过改善数字技术环境和数字创业环境两方面培育数字环境,进而协同赋能数字生态文明建设。

生态保护引导机制。绿色数字政策协同有利于引导生态保护,主要表现在优化能源结构和减少环境污染。一方面,绿色数字政策协同城市通常会制定并发布可再生能源发展的相关规划,从供给侧为可再生能源产业培育提供支持,以弥补产业发展初期存在的市场失灵现象。而严格的环境规制既可快速拉动可再生能源的消费需求,又能不断增加可再生能源的有效供给,由此直接降低化石能源利用比例,并持续激发可再生能源技术创新(马丽梅和司璐,2022),从而实现能源结构优化。另外,政策协同城市能够利用数字基础设施打通能源产业信息堵点,共享上中下游信息及资源,进而实现能源产业价值链的重构与升级。同时,数字基础设施所产生的正外部性能够拉动企业和消费者的投资需求,整合能源消费市场,推动能源产业结构高级化。另一方面,绿色数字政策协同聚焦绿色生活领域,能从建筑节能和低碳交通两方面发力,减少污染物排放。在提倡建筑节能方面,政策协同城市在建筑中大规模使用可再生能源,力求实现住宅零排放。在发展低碳交通体系方面,政策协同城市积极建立低碳交通运输体系,尽可能减少污染气体排放。同时,政策协同城市更易建立高效的温室气体排放数据统计和管理体系,旨在更好地完善数据收集和核算系统,精准地加强温室气体排放统计工作,为地区温室气体减排治理提供可靠支持(宋弘等,2019)。此外,政策协同城市通常具备高质量的网络基础设施,这既有助于加大对产业污染排放的监测力度,抑制大气污染排放,也能促使高污染产业内部分工更加细致,减少生产过程中非必要的污染物排放(牛子恒和崔宝玉,2021)。进一步,提高环境保护水平往往会对绿色数字技术应用提出更高的要求。为持续改善生态环境,政府通常会持续引导企业将绿色技术、数字技术广泛应用于清洁生产、污染物监测和环境治理等关键领域,在此过程中,生态文明建设的数字化和生态化特色会得到稳步增强。另外,增强环境保护能力还能从源头上减少污染物排放,从根源上解决生态文明建设过程中的绿色转型和环境治理问题,进而对数字生态文明发展产生积极作用。不难发现,绿色数字政策能通过优化能源结构和减少环境污染两方面引导生态保护,进而协同赋能数字生态文明建设。基于此,本文提出:

H2:绿色数字政策能够通过经济结构优化、数字环境培育和生态保护引导等渠道协同赋能数字生态文明建设。

(3)绿色数字政策协同赋能数字生态文明的异质机制。本文认为,唯有从经济发展特征、数字转型情况和生态基础状况三方面重点着力,方能发挥政策协同赋能的最大效益。

从经济发展特征看,不同经济基础和财政分权水平的城市的绿色数字政策协同效应可能存在偏差。一般来说,经济基础较好的城市往往拥有更强的经济、政治和公共资源集聚能力,既能促进各类资源的

合理流动,有效实现经济发展的良性循环,又可更好地响应绿色数字政策协同的“绿色—数字”复合使能要求(孙凤辉和许恒周,2023),从而推动数字生态文明建设。相应地,经济基础较差的城市为寻求经济快速增长,通常偏好于引进经济效益好的高污染企业,导致生态环境被破坏的同时,阻碍了绿色高技术产业发展;同样,高财政分权意味着地方政府拥有较大的经济自主权,这可能导致地方政府对生产性项目投资过度偏好、重污染产业的盲目扶持以及各类外资的大规模引进,反而会对数字生态文明建设产生迟滞冲击。相反,较低的财政分权意味着地方政府对中央转移支付的依赖程度更大,通常使得中央政府财政激励对该类城市的约束作用更明显。这种情况下,低财政分权城市通过扶持高污染企业获得更高财政收入的动力就显得不足,从而使得绿色数字政策赋能数字生态文明建设的协同效应更为显著。

从数字转型情况看,数字产业发展与产业数字应用水平不同的城市的绿色数字政策协同效应可能会存在一定差异。高数字产业发展城市虽能为数字生态文明建设提供更为丰富的数字技术、产品、服务和基础设施,但其产业快速发展通常需要更高水平的数字技术和更完善的政策保障体系作为支撑。然而,前沿领域的数字绿色技术在短期内通常难以实现持续性的长足进步,政策保障体系的优化也需要通过循序渐进的试验试点方能逐步完善,这均为城市加快发挥政策协同的“合力效应”提出了更高要求,从而可能使得短期内政策协同的积极效果不够明显。相应地,低数字产业发展城市存在核心技术、基础研究相对薄弱,数字技术转化及应用场景较为有限等问题,其经济社会发展通常具有较大的转型升级空间和潜力,使得绿色数字政策能更有效地推动经济数字化、绿色化协同发展,从而驱动数字生态文明建设;此外,高产业数字应用城市通常具有更高的转型发展要求,致使绿色数字政策协同难以持续与数字生态文明建设的现实要求相匹配,加之该类城市数字应用起步早、基础好,绿色数字政策协同赋能的红利可能已提前释放。而低产业数字应用城市由于较为薄弱的数字应用基础,其依托绿色数字政策反而更能激发数字生态文明建设的“后发优势”,表现为该类城市利用现代数字技术、先进互联网和人工智能技术,既能对传统产业进行全方位、全角度和全链条的改造升级,又可快速催生出绿色智慧研发、绿色智慧生产、绿色智慧生活等新业态,进而更好地推进绿色智慧的数字生态文明建设。

从生态基础状况看,在资源型—非资源型城市与老工业—非老工业基地等不同生态基础的城市,绿色数字政策的协同赋能效果可能也不相同。资源型城市存在产业结构单一、环境污染以及过度依赖自然资源的发展弊端,这些缺陷往往会制约绿色数字政策协同赋能数字生态文明建设的实际效果。相应地,非资源型城市经济增长动力足、发展前景好,政府对数字产业、环境友好型产业的支持力度普遍较大,这能为绿色数字政策协同赋能提供更优越的外部环境。因此,相对于非资源型城市,资源型城市更加难以有效发挥政策协同效应。另外,老工业基地普遍存在产业层次低、发展方式粗放、空间布局不合理和环境污染严重等一系列突出矛盾,该类城市协同实施绿色数字政策更能起到“雪中送炭”的积极效果,从而促进数字生态文明建设。而非老工业基地大力发展新兴产业,数字化、绿色化协同发展动力足,对政策协同赋能要求高,使得绿色数字政策短期内难以起到“立竿见影”的成效。基于此,本文提出:

H3:对于经济基础较好和财政分权水平较低、数字产业发展和产业数字应用水平较低、非资源型和老工业基地城市,绿色数字政策协同赋能数字生态文明建设的积极效果更为明显。

三、研究设计

1. 模型构建

本文基于低碳城市试点与“宽带中国”战略构造政策协同赋能的复合型准自然实验,探究绿色

数字政策能否对数字生态文明建设产生协同效应,构建如下部分线性的双重机器学习模型:

$$DEC_{it} = \theta_0 Policy_{it} + g(X_{it}) + U_{it}, E(U_{it} | Policy_{it}, X_{it}) = 0 \quad (1)$$

其中, i 为城市, t 为年份; DEC_{it} 为数字生态文明, $Policy_{it}$ 为低碳城市建设与“宽带中国”战略的政策协同变量; U_{it} 为误差项,条件均值为0; X_{it} 为高维控制变量的集合, $g(X_{it})$ 的具体形式 $\hat{g}(X_{it})$ 需通过机器学习算法估计。基于式(1)可得系数估计量:

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} Policy_{it}^2 \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} Policy_{it} (DEC_{it} - \hat{g}(X_{it})) \quad (2)$$

为使得系数估计量在小样本下满足无偏性,构建如下辅助回归:

$$Policy_{it} = m(X_{it}) + V_{it}, E(V_{it} | X_{it}) = 0 \quad (3)$$

其中, $m(X_{it})$ 为核心解释变量对高维控制变量的回归函数,其具体形式 $\hat{m}(X_{it})$ 可通过机器学习算法估计。 V_{it} 表示误差项,条件均值为0。具体方法如下:对式(3)进行回归,得到残差 $V_{it} = Policy_{it} - \hat{m}(X_{it})$, \hat{V}_{it} 作为 $Policy_{it}$ 的工具变量进行回归,可得无偏的估计系数:

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} \hat{V}_{it} Policy_{it} \right)^{-1} \frac{1}{n} \sum_{i \in I, t \in T} \hat{V}_{it} (DEC_{it} - \hat{g}(X_{it})) \quad (4)$$

2. 变量设定与分析

(1)被解释变量。数字生态文明(DEC)是本文的被解释变量。数字生态文明是一个综合性、系统化的复杂概念,而单一指标仅能体现数字生态文明建设的局部事实,难以全面揭示其真实水平。鉴于此,本文从数字生态文明的内涵和外延出发,按照全面性、科学性、导向性、有效性和可操作性的基本原则,以及考虑地级市数据的可获性,从数字生态文明基础条件、数字生态文明技术支撑、数字生态文明建设成效和数字生态文明建设保障四个维度选取30项细分指标,构建数字生态文明指标体系,具体见表1^①。为避免主观因素和客观局限的影响,这里采用熵值法测度2011—2021年全国282个地级市层面的数字生态文明建设水平指数。结果发现,考察期内城市数字生态文明建设水平虽总体呈现上升态势,但尚存在较大提升空间,且城市间的数字生态文明水平差距有扩大趋势,中国数字生态文明建设任重道远^②。

(2)核心解释变量。基于低碳城市试点与“宽带中国”战略构造的绿色数字政策变量($Policy_{it}$)为本文的核心解释变量,表示城市虚拟变量 $Treat_{it}$ 与时间虚拟变量 $Post_{it}$ 的乘积。对于前者,将同步试点绿色数字政策的37个城市设为实验组,即 $Treat_{it}$ 为1;其他245个城市列为对照组,即 $Treat_{it}$ 为0。对于后者,将样本在同时实施绿色数字政策的首年及以后赋值1,反之则赋值0。

(3)机制变量。①经济结构优化指标,基于要素配置(CS)和产业结构(IS)两方面来刻画。对于前者,基于超越对数生产函数科学测度“价格扭曲”指数,并从资本市场角度测度要素配置水平^③,其值越大,表明要素配置水平越高。对于后者,采用产业结构高级化来衡量,选取第三产业与第二产业增加值的比值来表示。②数字环境培育指标,从数字技术环境(DTC)和数字创业环境(DEA)两维度来衡量。对于前者,从机器人技术冲击视角作考察,采用机器人安装密度来表征。对于后者,应用“天眼查”平台爬取各城市年度新创企业数,选择每百万人信息传输与科研技术服务行业新创企业数来衡量。③生态保护引导指标,从能源结构(ES)与污染排放(PE)两方面来衡量。对于前

① 细分指标选择依据参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 具体评价方法和测度结果分析参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

③ 具体指标测算参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

表 1 数字生态文明指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	单位	指标属性	权重
数字生态文明基础条件	数字基础	每百人互联网用户数	户	+	0.0066
		每百人移动电话用户数	户	+	0.0053
		人均电信业务总量	元/人	+	0.0125
	生态基础	人均公园绿地面积	平方米/人	+	0.0018
		人均占有耕地面积	平方米/人	+	0.0107
		城市人口密度	人/平方千米	-	0.0004
数字生态文明技术支撑	数字技术	人工智能专利授权数量占比	%	+	0.0526
		物联网专利授权数量占比	%	+	0.0498
		区块链专利授权数量占比	%	+	0.0640
	绿色技术	清洁能源专利授权数量占比	%	+	0.0530
		环保材料专利授权数量占比	%	+	0.0462
		化石能源降碳专利授权数量占比	%	+	0.0677
数字绿色技术	数字形式的绿色专利授权数量	件	+	0.0892	
数字生态文明建设成效	数字转型	金融科技公司数	个	+	0.1065
		计算机和软件从业人员占比	%	+	0.0147
		中国数字普惠金融指数	—	+	0.0030
	绿色转型	工业固体废物综合利用率	%	+	0.0015
		空气良好以上天数达标率	%	+	0.0009
		建成区绿化覆盖率	%	+	0.0003
数绿融合发展	国家绿色数据中心数量	个	+	0.0939	
	生态环境大数据试验区数量	个	+	0.0748	
	数绿融合产业营业总收入	亿元	+	0.0398	
数字生态文明建设保障	重视程度	财政环境保护支出占比	%	+	0.0169
		财政科技支出占比	%	+	0.0115
		政府环保注意力	%	+	0.0023
		政府数字关注度	%	+	0.0090
	保护力度	环境保护法规数量	件	+	0.0246
		知识产权法规数量	件	+	0.0069
环境保护处罚案件数		件	+	0.0781	
知识产权审判结案数		件	+	0.0554	

者,根据林伯强和吴微(2018)的观点,使用工业用电占比来表征。对于后者,运用熵值法综合测算工业废水、二氧化硫与烟尘(三废)排放量来反映,其数值越低,表明生态保护水平提高。

(4)控制变量。为保证政策效应估计的准确性,本文还控制了可能影响数字生态文明的其他变量:①教育投入(*Education*),用教育支出与地方财政一般公共预算内支出之比来衡量;②失业水平(*Unemp*),使用年末城镇登记失业人数与年末总人口之比来体现;③经济发展水平(*Ngdp*),用人均地区生产总值来刻画;④金融规模(*Finance*),采用年末金融机构各项存贷款余额除以地区生产总值来反映;⑤人口规模(*People*),选取人口自然增长率来表征;⑥对外开放水平(*Open*),使用以人民币表示的外商直接投资与地区生产总值之比来替代;⑦城镇化(*Cityrate*),采取城镇户籍人口与总户籍人口的比值来衡量;⑧人力资本(*EduPOP*),用每万人在校大学生人数的自然对数来反映。

3. 数据来源与平行趋势检验

本文采用2011—2021年中国282个地级市面板数据开展研究(考虑到数据的可获性和连续性,未包括西藏自治区、中国港澳台地区,以及三沙、儋州、毕节等数据缺失较多的城市)。基础数据来自数字经济研究数据库、相关年份《中国城市统计年鉴》、北大法宝数据库、国泰安CSMAR数据库等,对于缺失数据,采用插值法补齐^①。

另外,研究样本中,低碳试点城市有69个,“宽带中国”战略试点城市有107个,实施复合政策城市有37个,143个城市未进行低碳城市与“宽带中国”战略建设。在基准识别策略中,实验组为37个复合政策城市,而对照组为其他245个城市。由平行趋势检验结果可知^②,在绿色数字政策实施前,数字生态文明建设在实验组与对照组之间并没有显著差异,且整体呈现出平缓波动趋势,排除了存在事前趋势的可能。而在绿色数字政策实施后,实验组与对照组的数字生态文明建设存在显著差异,且回归系数逐渐增大,表明平行趋势假设成立。

四、实证结果及分析

1. 基准回归分析

本文将数字生态文明(DEC)作为被解释变量,代入双重机器学习模型进行估计,选用随机森林算法对多种识别策略进行逐步回归分析,结果见表2。第(1)列展示了以绿色政策试点城市为实验组、“无试点”城市为对照组的估计结果, $P1$ 系数显示了低碳城市试点影响数字生态文明建设的净效应。据此可知,选择样本分割比例为1:2且控制城市、时间固定效应后,单一绿色政策对数字生态文明建设的影响系数约为0.09且显著,表明低碳城市试点对数字生态文明建设有积极作用。同理,第(2)列展示了以数字政策试点城市为实验组、“无试点”城市为对照组的估计结果, $P2$ 系数可评估“宽带中国”战略政策冲击的净效应。不难发现,单一数字政策对数字生态文明的影响系数约为0.07且显著,说明“宽带中国”战略亦有效地促进了数字生态文明建设。

在单一政策估计的基础上,这里仅保留复合政策和“无试点”样本进行估计,设置政策协同城市样本为实验组、“无试点”城市样本为对照组,以识别绿色数字政策协同与数字生态文明建设间的因果关系, $P3$ 系数可评估绿色数字协同政策冲击的净效应。根据第(3)列结果可知,绿色数字政策对数字生态文明建设产生了积极的协同影响;同时,为探究政策协同是否具备比单一政策更佳的政策绩效,这里设置政策协同城市样本为实验组、单一政策城市样本为对照组进行估计, $P4$ 系数可评估绿色数字协同政策相较于单一政策影响数字生态文明建设的净效应。结果见第(4)列,可以发现,相较于单一政策,绿色数字政策协同对数字生态文明建设的积极冲击更为有效;进一步,第(5)列展示了以政策协同城市样本为实验组、单一政策试点城市和“无试点”城市样本为对照组的估计结果,可知绿色数字政策的回归系数为正且显著。第(6)列是在第(5)列基础上加入控制变量一次项的估计结果,第(7)—(9)列分别是在第(6)列基础上加入控制变量二次项,且样本分割比例依次为1:2、1:4和1:6的估计结果,回归系数均显著为正,再次表明绿色数字政策能协同推进数字生态文明建设,H1得到验证。比较估计系数大小和稳健标准误可知,当样本分割比例为1:6时所得到的估计结果较好,故本文后续实证分析中均采用1:6样本分割比例进行分析。

^① 变量的描述性统计参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

^② 平行趋势检验结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

表 2 基准回归结果

变量	Kfolds=3							Kfolds=5	Kfolds=7
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC	DEC
<i>Policy</i>					0.1413*** (0.0056)	0.0107*** (0.0038)	0.0107*** (0.0036)	0.0059* (0.0035)	0.0074** (0.0034)
<i>P1</i>	0.0866*** (0.0051)								
<i>P2</i>		0.0742*** (0.0046)							
<i>P3</i>			0.1209*** (0.0067)						
<i>P4</i>				0.1038*** (0.0072)					
控制变量一次项	否	否	否	否	否	是	是	是	是
控制变量二次项	否	否	否	否	否	否	是	是	是
城市、时间效应	是	是	是	是	是	是	是	是	是
观测值	3102	3102	1980	1529	3102	3102	3102	3102	3102

注：***、**、*分别表示在1%、5%、10%的水平上显著；括号内数字为稳健标准误。以下各表同。

2. 稳健性检验^①

(1) 替换被解释变量。①采用单一指标,将被解释变量替换为数字形式的绿色专利授权量指标进行再估计;②更换计算方法,应用主成分分析法重新计算数字生态文明建设指数再估计。结果发现,政策协同赋能的积极作用依然明显,印证了基本结论的可靠性。

(2) 调整研究样本。①剔除自治区和直辖市样本,将样本中属于自治区和直辖市的城市剔除后再估计;②改变研究时段,将研究区间随机调整为2013—2019年再估计。结果表明,绿色数字政策对数字生态文明的积极协同作用依然明显,与基准回归结果保持一致。

(3) 剔除并行政策干扰。为排除研究区内相关政策可能对估计结果产生的干扰,本文控制2011年开始推行的“碳排放权交易试点”(Carbon Trading)和2012年起实施的“智慧城市”(Smart City)政策虚拟变量进行估计。结果可知,在剔除同期其他相关政策后,绿色数字政策协同对数字生态文明建设的积极作用依然显著,说明基准结论稳健。

(4) 更换机器学习算法。为避免双重机器学习算法设定偏误对基准结论产生干扰,这里将前文所用的随机森林算法更换为套索回归、梯度提升以及岭回归进行再估计。结果表明,更换机器学习算法后,本文基准结论依然稳健。

3. 内生性检验^②

(1) 工具变量法。考虑到数字生态文明建设水平的提高可能会增加其“自下而上”申报成为低碳城市建设试点和“宽带中国”战略试点城市的可能性,由此带来的反向因果关系可能会引发内生性问题,这里构造以下两种工具变量:①选用各地级市与省份最近边界距离作为绿色数字政策的工具变量。省际交界地带经济发展和公共品提供水平相对滞后,离省界地区越远,越可能成为绿色数字政策试点地区,满足工具变量的相关性要求。而地级市与省份最近边界距离是自然地

① 稳健性检验结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajecass.com)附件。

② 内生性检验结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajecass.com)附件。

理变量,不受数字生态文明建设的影响,满足外生性要求。此外,考虑到该工具变量是横截面形式,同时为缓解数据偏度问题,采用地级市到省份最近边界距离与时间趋势项交互项的自然对数作为工具变量(*distance*)进行检验。②基于黄群慧等(2019)的处理方式,选择各地级市2001年每百人移动电话数据作为绿色数字政策的工具变量。历史上的移动电话数量会在一定程度上影响城市数字发展基础,移动电话数量越多,越有可能具备城市数字发展优势,成为绿色数字试点城市的可能性越高,满足相关性要求。而数字生态文明建设水平不会对历史上的移动电话数量产生影响,满足外生性要求。同样,这里使用2001年每百人移动电话数据与时间趋势交互项加1的自然对数形式作为工具变量(*telephone*)进行检验。基于双重机器学习的部分线性工具变量模型估计可知,两种工具变量的估计系数均显著为正,表明即使考虑内生性干扰后,本文的基准结论依然可靠。

(2)样本选择偏误。低碳城市建设与“宽带中国”战略的试点城市并非随机选择,通常与城市的地理位置、现有经济发展水平和环境资源约束等密切相关,这些城市固有差异随时间推移可能对数字生态文明建设产生影响,从而造成政策效应估计偏差。借鉴Lu et al. (2017)的做法,本文在基准回归模型中加入城市属性变量和时间趋势项的交叉项,采用是否为经济特区城市、是否为大气重点控制区以及城市地势起伏度控制城市固有差异对数字生态文明建设的影响。结果发现,在考虑城市固有差异影响后,绿色数字政策依然对数字生态文明建设产生了积极影响。

4. 传导机制分析

根据前文理论分析和江艇(2022)的观点,这里从经济结构优化、数字环境培育、生态保护引导三维度做机制检验,估计结果见表3。可以发现,绿色数字政策可通过经济结构优化、数字环境培育及生态保护引导等渠道协同促进数字生态文明建设,印证了H2成立。

表3 传导机制检验

变量	经济结构优化		数字环境培育		生态保护引导	
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>CS</i>	<i>IS</i>	<i>DTC</i>	<i>DEA</i>	<i>ES</i>	<i>PE</i>
<i>Policy</i>	0.0030** (0.0013)	0.0702* (0.0389)	0.9119** (0.4367)	0.0296*** (0.0091)	-0.0308*** (0.0099)	-0.0243*** (0.0053)
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
城市、时间效应	是	是	是	是	是	是
观测值	3102	3102	3102	3102	3102	3102

(1)经济结构优化机制。表3第(1)、(2)列展示了经济结构优化机制的检验结果,绿色数字政策对要素配置(*CS*)和产业结构高级化(*IS*)的影响系数均显著为正,表明绿色数字政策能协同促进要素配置优化并推动产业结构高级化。一方面,要素有效配置促使要素供给效率提高,可明显缓解企业融资约束,而稳定、高效的要素投入不仅能支撑企业加大研发投入,对企业创新产生正向影响,也有利于企业数字化转型和绿色升级。同时,要素从低效率企业向高效率企业流动,不仅能降低要素错配程度、提高要素使用效率,还可以鼓励更多绿色环保型企业进入市场,缓解经济发展和环境保护之间的矛盾(吕岩威和李禹陶,2023),进而有利于数字生态文明建设。另一方面,产业结构高级化是在劳动密集型—资本密集型—技术密集型顺次演进过程中实现的,这一过程演变对技术创

新的要求逐步提高,既为数字化应用提供了持续的市场需求,也能不断促进产业数字化转型升级。此外,科学技术水平提高是产业结构高级化的一个明显特征,科学技术发展进一步扩展了可再生清洁能源的使用,有助于加速推动数字技术和绿色技术的深度融合,进而有效推动数字生态文明建设。

(2)数字环境培育机制。由表3第(3)、(4)列可知,绿色数字政策对数字技术环境(DTC)和数字创业环境(DEA)的影响系数均显著为正,表明绿色数字政策协同可有效培育数字技术环境和数字创业环境。一方面,数字技术环境培育所释放的要素集聚效应为培育数绿融合产业核心竞争力提供资源支持,一定程度上有助于加速赋能生态产品价值实现,推动生态环境的高水平数字化保护。另外,数字技术环境培育激活了数据要素价值潜能,能有效破除传统经济对有形资源和能源的过度依赖,其参与经济活动的过程高度契合数字生态文明建设的内在要求。另一方面,数字创业环境培育有助于企业通过技术购买获取外部知识,并应用到数绿融合的使用场景中,便于实现企业数字化、绿色化融合的转型发展。与此同时,数字创业环境还具有高度的开放性特征,可助力企业共享技术基础设施,促进自身与环境监测机构等主体间的连接与互动,在合作研发过程中实现绿色数字价值共创,进而推动数字生态文明建设。

(3)生态保护引导机制。根据表3第(5)、(6)列可知,绿色数字政策对能源结构(ES)和污染排放(PE)的影响系数均显著为负,说明绿色数字政策可有效改善能源结构和遏制环境污染。一方面,能源结构优化的前景规划是发展综合智慧的能源系统,而能源数字技术创新是能源转型的核心驱动力,这对各主体合作研发绿色数字技术和产品具有天然要求,有利于为推动数字生态文明建设提供技术支撑。此外,能源结构优化是生态文明建设的重要组成部分,大力发展可再生能源,减少对化石能源依赖,能够从源头上减少温室气体和大气污染物的排放,进而切实推进数字生态文明建设。另一方面,为实现经济效益和环保节能“双提升”,环境污染治理通过引导和鼓励企业开发和使用绿色生产工艺及环保新技术,来促进绿色经济高质量发展。同时,通过加强绿色合作治理,企业往往会采用一致的环境策略,这既有利于绿色链条整合,降低绿色成本,又有助于以环保动机带动环保行为,降低废物排放,提高环境质量,进而对数字生态文明建设产生积极影响。

5. 异质性分析

基于前文构造的“经济—技术—生态”分析框架,本文利用部分线性的双重机器学习模型,进一步探析不同经济发展特征、数字化转型情况与生态基础状况下绿色数字政策协同赋能数字生态文明建设的差异化效能,结果与H3预期一致。

(1)经济发展异质性。一方面,这里将直辖市、副省级城市和省会城市划分为经济基础较好城市,其他城市划分为经济基础较差城市,估计结果如表4第(1)、(2)列所示。相对而言,绿色数字政策对经济基础较好城市产生了更有效的协同效应。原因可能是,经济基础较好的城市通常会在经济发展、技术水平和公共资源等方面具有先天优势,容易产生“强者愈强、弱者愈弱”的马太效应。同时,经济基础较好的城市多为区域中心城市,污染避难所效应导致的中心城市污染产业向外围城市转移也是产生这一现象的重要原因。另一方面,从财政自由度角度刻画财政分权,具体计算方法如下:财政自由度=地方财政一般预算内支出/地方财政一般预算内收入,将该指标等分为高、低两种组别。基于表4第(3)、(4)列结果可知,绿色数字政策对低财政分权城市的数字生态文明建设有显著的积极影响,而这种激励效果在高财政分权城市不显著。从实际看,在财政分权较高的城市,地方政府为刺激地方经济高速增长,可能会不断放松市场和环境门槛,容易形成“逐底竞争”局面并诱发“污染天堂”现象,从而对数字生态文明建设产生不利影响。

表4 经济发展异质性检验

变量	经济基础		财政分权	
	好	差	高	低
	(1)	(2)	(3)	(4)
	DEC	DEC	DEC	DEC
Policy	0.0117*** (0.0044)	0.0083** (0.0036)	0.0032 (0.0032)	0.0196*** (0.0061)
控制变量一次项	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是
城市、时间效应	是	是	是	是
观测值	374	2728	1551	1551

(2)数字化转型异质性。一方面,按数字产业化指标划分高数字产业发展城市和低数字产业发展城市,具体以《中国数字经济发展白皮书(2021)》对不同省份数字产业化占GDP比重的排名为依据。数字产业发展异质性的估计结果如表5第(1)、(2)列所示,可知绿色数字政策对低数字产业发展城市的数字生态文明建设有显著的积极影响,而这种激励作用在高数字产业发展城市并不显著。可能原因在于,高数字产业发展城市通常具有更高的数字绿色技术要求,而新技术的升级和跃迁并非一蹴而就,致使短期内政策协同难以持续与现实发展有效匹配,加之该类地区政策协同赋能的积极作用可能已提前释放,最终导致政策协同驱动的效果不明显。另一方面,依据《中国数字经济发展白皮书(2021)》对不同省份产业数字化占GDP比重的排名,并参照上述方法对产业数字应用异质性进行检验。估计结果如表5第(3)、(4)列所示,不难发现,相对而言,绿色数字政策对低产业数字应用城市数字生态文明建设的激励效果更明显。原因可能是,低产业数字应用城市通常具备较低的发展基础,反而使得绿色数字政策的实施更易于加快数字技术与传统产业深度融合,并利用数字技术为传统产业绿色转型升级提供技术支撑、数据支持和算法赋能,不断降低产品生产成本和减少资源能源消耗,从而表现出更明显的政策协同赋能效果。

表5 数字化转型异质性检验

变量	数字产业发展		产业数字应用	
	高	低	高	低
	(1)	(2)	(3)	(4)
	DEC	DEC	DEC	DEC
Policy	0.0044 (0.0040)	0.0148*** (0.0040)	0.0053 (0.0045)	0.0093* (0.0054)
控制变量一次项	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是
城市、时间效应	是	是	是	是
观测值	1672	1430	1538	1564

(3)生态基础异质性。一方面,基于《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020年)》,将研究样本划分为资源型城市和非资源型城市,估计结果如表6第(1)、(2)列所示。不难发现,绿色数字政策对非资源型城市的数字生态文明有显著的积极影响,而在资源型城市,绿色数字政策的协同赋能效应不明显。从实际看,资源型城市通常存在“资源诅咒”现象,短期内难以有效调整和优化资源结构,清洁技术应用和升级空间较为有限。同时,该类城市往往经济发展滞后、人才流失严重,数字技术研发投入不足,难以为绿色数字政策协同赋能创造有利条件。另一方面,依据《全国老工业基地调整改造规划(2013—2022年)》,将研究样本划分为老工业基地城市和非老工业基地城市。表6第(3)、(4)列展示了老工业基地城市和非老工业基地城市异质性的估计结果。可以发现,两种情景下绿色数字政策均有显著的赋能效果,但这种积极作用在老工业基地城市更为明显。原因可能是,老工业基地产业结构老化单一、高污染企业集聚、绿色转型压力大,由此其生态环境改进空间大,使得绿色数字政策在一定程度上更能推动该类城市的节能减排和生态环境保护,从而推进数字生态文明建设。非老工业基地城市新兴产业发展迅速,城市绿色转型压力较小,反而使得短期内绿色数字政策的协同促进作用相对有限。

表6 生态基础异质性检验

变量	资源型—非资源型城市		老工业—非老工业基地	
	资源型	非资源型	老工业	非老工业
	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>DEC</i>	<i>DEC</i>	<i>DEC</i>	<i>DEC</i>
<i>Policy</i>	0.0001 (0.0276)	0.0064** (0.0029)	0.0291*** (0.0098)	0.0066** (0.0034)
控制变量一次项	是	是	是	是
控制变量二次项	是	是	是	是
城市、时间效应	是	是	是	是
观测值	1111	1991	1034	2068

五、进一步分析

1. 政策比较分析

为进一步探索低碳城市试点与“宽带中国”战略的绿色数字政策组合的协同效应,本文从政策协同与单一政策的净效应对比以及政策协同实施先后顺序的净效应对比,讨论绿色数字政策赋能的协同效果^①。

(1)单一政策与绿色数字政策协同的净效应对比。这里剔除了所有“无试点”城市样本重新构造实验组和对照组,设置政策协同城市样本为实验组,单一绿色政策城市样本或单一数字政策城市样本为对照组。结果发现,相较于单一绿色政策和数字政策,绿色数字政策协同对数字生态文明建设积极作用更为明显,且在“宽带中国”战略城市作为对照组时,绿色数字政策能发挥更好的协同效应。可能的原因在于,低碳城市试点政策具有“因地制宜”的鲜明特征,上级政府明确政策方向,地

^① 政策比较分析结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

方政府结合城市人才、技术、资源等基础条件自行探索低碳转型路径的具体方法。这使得该类城市在具备人工智能等数字技术应用的基础上,积极探索和建设自身的美丽中国数字化治理体系,从而对建设数字生态文明发挥更大的积极作用。

(2)绿色数字政策协同实施先后顺序的净效应对比。保留先设立低碳城市且未成为政策协同城市的样本,将先试点低碳城市建设再试点“宽带中国”战略的城市设置为实验组,而仅成为低碳城市试点城市设置为对照组。回归系数反映了先成为低碳城市再成为“宽带中国”战略试点城市情景下政策协同影响数字生态文明建设的净效应。根据回归结果可知,先试点低碳城市再成为政策协同城市,数字生态文明建设协同效果更明显。同理,可以发现,先试点“宽带中国”战略再成为政策协同城市对数字生态文明建设的影响效果较弱。可能的原因在于,先实施“宽带中国”战略和低碳城市建设的政策协同试点时间分别为4年和7年,而政策实施时间与实施效果密切相关,可能使得先试点“宽带中国”战略的政策协同成效在短期内无法充分显现。

2. 空间收敛分析

为进一步刻画绿色数字政策对城市间数字生态文明差距的作用,本文选择空间收敛模型进行空间相对 β 收敛检验。一方面,基于空间邻接矩阵,测度2011—2021年数字生态文明建设的空间Moran's I指数,并绘制了局部的Moran散点图^①。可以发现,中国数字生态文明建设存在显著空间正相关性,且数字生态文明发展水平较高和较低城市在地理空间上仍保持着原有相对集中的分布。另一方面,在空间相关性检验的基础上,选择空间误差模型(SEM)进行空间相对 β 收敛检验,评估单一绿色政策、单一数字政策以及绿色数字政策协同对缩小数字生态文明建设空间差距的空间效应。结果发现,上述政策均能明显地缩小城市间数字生态文明发展差距,且复合政策相较于单一政策对缩小数字生态文明建设的空间差距更为有效^②。这意味着,在绿色数字政策复合冲击下,数字生态文明建设的空间差距会更快缩小,从而加速由“马太效应”向“收敛效应”转变。

六、结论与政策启示

本文基于2011—2021年282个地级市面板数据,从数字生态文明的基础条件、技术支撑、建设成效和建设保障四个维度构建数字生态文明建设指标体系和指数,并基于双重机器学习模型,探索绿色数字政策协同赋能数字生态文明建设的内在机制和多维效应。结果表明:①绿色数字政策对数字生态文明建设具有显著的协同效应,且相较于单一政策,政策协同的赋能效果更为明显。②绿色数字政策可通过发挥经济结构优化效应、数字环境培育效应和生态保护引导效应,有效协同赋能数字生态文明建设。③绿色数字政策对数字生态文明建设的影响效果在不同经济发展特征、数字化转型情况和生态基础状况下表现出显著的异质性特征。④相较于先成为“宽带中国”战略试点城市再成为低碳城市,先成为低碳城市再成为“宽带中国”战略试点城市能更好地发挥绿色数字政策的协同共促效应。⑤相较于单一绿色政策或单一数字政策,绿色数字政策协同更有助于缩小地区间的数字生态文明发展差距。根据上述结论,本文提出以下政策建议:

(1)强化绿色数字政策协同联动、放大组合效应,确保对数字生态文明建设同向发力、形成合力。一方面,强化顶层设计,加快数绿协同发展。既要积极出台国家层面统一的数绿协同政策和行

① 空间Moran's I指数分析结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 空间收敛模型选择分析及空间 β 收敛结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

动指南,不断健全全域联动、立体高效的国家生态安全防护体系,并尝试在领先城市加快实现绿色数字政策协同先行先试,打造数字生态文明先行区,持续深入扩大绿色数字政策的实施力度、精度、广度和深度,又要巩固央地绿色化数字化发展联动,中央应积极引导地方政府将绿色数字政策协同纳入“十五五”发展规划和数字中国、美丽中国等重大战略,对数字生态文明建设的智库建设和科技人才培养等重点领域提供资源支持和政策倾斜,充分调动地方政府推动绿色化数字化协同发展的积极性和能动性。另一方面,推动深度融合,聚焦关键领域发力。各级政府既应不断挖掘绿色数字政策的协同赋能潜力,通过建设生态数据统一共享开放平台、探索区域性环保建设项目投融资模式创新、共建产学研绿色低碳产业创新中心等复合手段,加快绿色数字政策与数字生态文明领域的深度融合,又要以协同构建美丽中国数字化和数字中国绿色化治理体系为抓手,健全天空地海一体化监测网络,实现降碳、减污、扩绿协同监测和治理全覆盖,从而加快建设绿色智慧的数字生态文明。

(2)充分利用绿色数字政策在经济结构优化、数字环境培育和生态保护引导中的重要作用,进而发挥更佳的数字生态文明建设效能。①健全生态产品价值实现机制,大力发展绿色数字金融,支持符合条件的企业发行绿色数字债券,积极引导各类金融机构和社会资本加大绿色数字科技投入,为数字生态文明建设提供坚实的资本要素支撑。同时,加快产业数字化同绿色化深度融合,建设以实体经济为支撑的现代化产业体系,大力发展战略性新兴产业和数绿融合产业,推进重点领域绿色低碳发展和数字化升级,进一步赋能绿色智慧的数字生态文明建设。②加强适应智慧决策和绿色发展的数字基础设施建设,不断制定和完善绿色数字技术领域的财税、科技和产业等多维度政策,为加快数字技术发展打好基础。同时,多管齐下优化数字创业环境,积极完善城市数字创业保障机制,加快落实人才安居乐业工程,大力培养和引进兼具数字技术与生态环境专业知识的复合型跨界人才,持续增强创业群体的意愿和信心,不断激发数字创业活力,进一步赋能数字生态文明建设。③坚持先立后破,加快建设新型能源体系,重点控制煤炭等传统化石能源消费,持续提升可再生能源利用效率。同时,持续打好蓝天、碧水、净土保卫战,构建天空地一体化生态环境监测体系,建立健全动态管理的生态环境数据目录,不断提升生态环境综合管理和决策数字化、智能化水平,加快推进环境污染治理能力现代化,从而为加快数字生态文明建设创造有利条件。

(3)不断优化、细化绿色数字政策的实施策略,因地制宜、因需而变,梯次推进数字生态文明建设全域覆盖。从经济发展特征看,既要推动环境基础设施提级扩能,促进环境公共服务能力与人口、经济规模相适应,也要不断强化财政对数字生态文明建设支持力度,持续优化生态文明建设领域财政资源配置和提高财政资源利用效率,实现经济增长与数字生态文明建设的协调发展。从数字转型情况看,既要依靠龙头企业带动数字技术应用,构建政产学研用五位一体的绿色数字创新生态系统,持续推动绿色数字技术高水平发展和高质量跃升,也要加强对大数据的深度分析和价值挖掘,积极探索绿色数字技术升级改造传统产业的新途径、新模式,从而加快释放绿色数字政策的协同赋能红利。从生态基础状况看,既应结合自身生态禀赋实际,做好数绿融合规划,注重传统产业绿色化、数字化转型,逐步打破原有路径依赖,增强可持续发展能力,还要因地制宜开展内源污染治理和生态修复,切实解决历史遗留问题,稳步推进数字生态文明建设进程。

〔参考文献〕

- [1]白俊红,王星媛,卞元超.互联网发展对要素配置扭曲的影响[J].数量经济技术经济研究,2022,(11):71-90.
- [2]葛力铭,郑贺允,孙鹏博,朱佳玲.低碳赋能增效:低碳城市试点政策对环境福利绩效的影响[J].统计研究,2024,(2):100-113.

- [3]郭丰,任毅,柴泽阳.“双碳”目标下数字基础设施建设与城市碳排放——基于“宽带中国”试点政策的准自然实验[J].中国经济问题,2023,(5):164-180.
- [4]郭进.环境规制对绿色技术创新的影响——“波特效应”的中国证据[J].财贸经济,2019,(3):147-160.
- [5]郭秋秋,马晓钰.“宽带中国”战略和低碳城市双试点的减污效应研究[J].产业经济研究,2023,(5):129-142.
- [6]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.
- [7]焦豪,崔瑜,张亚敏.数字基础设施建设与城市高技能创业人才吸引[J].经济研究,2023,(12):150-166.
- [8]江艇.因果推断经验研究中的中介效应与调节效应[J].中国工业经济,2022,(5):100-120.
- [9]林伯强,吴微.中国现阶段经济发展中的煤炭需求[J].中国社会科学,2018,(2):141-161.
- [10]刘国菊.数字生态文明建设的内在逻辑与实践路径[J].人民论坛·学术前沿,2023,(18):87-91.
- [11]吕岩威,李禹陶.资本要素市场扭曲对经济高质量发展的影响及其机制研究[J].统计研究,2023,(5):51-63.
- [12]马丽梅,司璐.低碳城市与可再生能源技术创新[J].中国人口·资源与环境,2022,(7):81-90.
- [13]牛子恒,崔宝玉.网络基础设施建设与大气污染治理——来自“宽带中国”战略的准自然实验[J].经济学报,2021,(4):153-180.
- [14]余硕,王巧,张阿城.技术创新、产业结构与城市绿色全要素生产率——基于国家低碳城市试点的影响渠道检验[J].经济与管理研究,2020,(8):44-61.
- [15]施志源,景池.数字生态文明制度化:时代意蕴、发展困局与破局策略[J].中国地质大学学报(社会科学版),2024,(2):117-130.
- [16]宋弘,孙雅洁,陈登科.政府空气污染治理效应评估——来自中国“低碳城市”建设的经验研究[J].管理世界,2019,(6):95-108.
- [17]孙凤辉,许恒周.城市行政等级对土地利用效率的影响——基于资源集聚能力中介的视角[J].中国人口·资源与环境,2023,(11):219-230.
- [18]闫华飞,章雷敏,肖静.“宽带中国”和低碳城市双试点政策的碳减排效应——基于283个地级市的准自然实验[J].南京财经大学学报,2023,(5):69-78.
- [19]张高丽.大力推进生态文明 努力建设美丽中国[J].求是,2013,(24):3-11.
- [20]张淑惠,孙燕芳.新基建对区域“创新—生态—经济”耦合协调发展的影响——基于空间溢出效应和传导机制的检验[J].中国人口·资源与环境,2023,(10):187-198.
- [21]赵世新.建设绿色智慧的数字生态文明[N].光明日报,2023-11-05.
- [22]郑石明,尤朝春.中国低碳城市试点政策扩散模式及减污效应[J].中国软科学,2023,(10):98-108.
- [23]Chen, L., and K. Wang. The Spatial Spillover Effect of Low-carbon City Pilot Scheme on Green Efficiency in China's Cities: Evidence from a Quasi-natural Experiment[J]. Energy Economics, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2022>.
- [24]Feng, Y., Z. Chen, and C. Nie. The Effect of Broadband Infrastructure Construction on Urban Green Innovation: Evidence from a Quasi-natural Experiment in China[J]. Economic Analysis and Policy, 2023, 77: 581-598.
- [25]He, W., X. Wang, and M. Miao. Network Infrastructure and Corporate Environmental Performance: Empirical Evidence from “Broadband China”[J]. Energy Economics, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2024>, 2024.
- [26]Lu, Y., Z. Tao, and L. Zhu. Identifying FDI Spillovers[J]. Journal of International Economics, 2017, 107: 75-90.
- [27]Porter, M. E., and C.V.D.Linde. Toward a New Conception of the Environment-Competitiveness Relationship [J]. Journal of Economic Perspectives, 1995, 9(4): 97-118.
- [28]Wu, H., Y. Xue, Y. Hao, and S. Ren. How Does Internet Development Affect Energy-Saving and Emission Reduction? Evidence from China[J]. Energy Economics, <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105577>, 2021.

The Power of Institutional Innovation in the Construction of Digital Ecological Civilization: A Perspective of Policy Synergy Empowerment

HAN Xian-feng¹, GOU Ya-nan¹, XIAO Yuan-fei¹, LI Bo-xin²

(1. School of Management and Economics, Kunming University of Science and Technology;

2. School of Economics, Xi'an University of Finance and Economics)

Abstract: Accelerating the construction of a green and intelligent digital ecological civilization (DEC) is crucial for advancing the dual strategies of “Beautiful China” and “Digital China”. However, this topic has received insufficient academic attention, with theoretical research significantly lagging behind practical demands. Based on scientifically measuring the development of DEC, this paper explores the theoretical relationships and practical connections between green-digital policy synergy and the construction of DEC.

This paper, based on the construction of an urban DEC index, employs a quasi-natural experiment involving the dual policy synergy of the low-carbon city pilot and the “Broadband China” strategy. Utilizing the panel data from 282 prefecture-level cities in China from 2011 to 2021, this paper employs a dual machine learning model to empirically examine the synergistic mechanisms and multidimensional effects of these policies in facilitating the construction of DEC. The findings reveal that the green-digital policies have a significant synergistic and promotional effect on the construction of DEC, with the compound policies demonstrating more pronounced empowerment effects compared with the single policies. These conclusions remain robust after a series of robustness checks and endogeneity tests. Meanwhile, the green-digital policies not only directly drive the “green-digital” dual-wheel institutional innovation in the construction of DEC but also indirectly support it through optimizing economic structures, fostering digital environments, and guiding ecological protection. Further analysis indicates that the positive effects of the green-digital policy synergy are more prominent in cities with better economic foundations, lower fiscal decentralization, lower digital industry development and industrial digital application, non-resource-based and old industrial base cities, and those adopting a combined policy “green-first, digital-second”. Moreover, the current overall level of DEC in China remains relatively low, with significant room for improvement. The DEC disparity among cities shows a widening trend. Green-digital policies are not only a crucial driving factor for synergistically promoting the construction of DEC but also a determining factor in overcoming the “Matthew effect” trap. This paper provides important insights for governments to strengthen the green-digital policy synergy, tap into the synergy of multidimensional policy integration, and scientifically accelerate the construction of a green and intelligent DEC under the new development paradigm.

Potential innovations of this paper are as follows. Firstly, it constructs a DEC index system for the first time and measures digital ecological civilization at the prefecture-level city, thus expanding the research boundaries. Secondly, it systematically constructs a theoretical framework of green-digital policy synergy empowerment by integrating “economy–technology–ecology”, and innovatively regards these policies represented by low-carbon city pilot and the “Broadband China” strategy as a compound quasi-natural experiment, systematically evaluating its influence mechanisms and effects on urban DEC in multiple dimensions including direct, indirect, and heterogeneous impacts. Thirdly, it employs the frontier econometric model of double machine learning for empirical characterization, which can avoid control variable redundancy and model misspecification issues, enhancing the accuracy and credibility of research results on policy empowerment. This paper enriches bilateral research on policy synergy empowerment and DEC construction, providing theoretical insights and decision-making references for accelerating the construction of ecological civilization from a new perspective of institutional innovation synergy.

Keywords: green-digital policies; collaborative promotion; digital ecological civilization; dual machine learning

JEL Classification: O13 O21 R11

[责任编辑:覃毅]