

数字化与绿色化协同发展的模式与路径

戚聿东 蔡青青 罗天舒*

摘要:数字化与绿色化协同并进是以数字技术提升全要素生产率,以绿色创新降碳减污扩绿,从而实现经济社会高质量发展的共赢之举。本文将协同论与耗散结构理论嵌入经济学框架,系统阐释数字化与绿色化协同发展的理论逻辑、典型模式与实施路径。数字化与绿色化协同的内在逻辑是将二者视为互为条件的耦合约束,经“制度—资本—空间”调节机制,触发系统从“局部协同”跃升至“全域协同”,形成可持续增长路径。研究提炼出以下三种数字化与绿色化协同发展模式:一是以“技术—数据—场景—系统”层级放大效应为核心的“技术牵引型”发展模式;二是基于“规制—价格—风险—声誉”传导链条的“规制驱动型”发展模式;三是依托“节点—链路—场域”三重共振的“空间网络型”发展模式。实践路径方面,从“技术—制度—空间”三个维度解构其实践路径:在技术维度,以“双向融合+创新突破”构建数字化与绿色化协同的核心驱动力;在制度维度,以“规则构建+机制创新”筑牢数字化与绿色化协同的保障体系;在空间维度,以“梯度布局+跨域协同”优化数字化与绿色化协同的空间格局。

关键词:数字化 绿色化 协同论 耗散结构理论 “双化协同”

一、引言

当前人类社会正同时处于以数字化转型与以绿色化发展两场深刻变革的交汇期。数字化以指数级增长的算力、算法和数据重构生产函数,以实现“数字中国”和新质生产力发展目标;绿色化则以碳排放总量与强度“双控”机制

* 戚聿东,教授,北京师范大学经济与工商管理学院,电子邮箱:qiyudong@bnu.edu.cn;蔡青青(通讯作者),硕士研究生,北京师范大学经济与工商管理学院,电子邮箱:c1772051187@163.com;罗天舒,博士研究生,北京师范大学经济与工商管理学院,电子邮箱:202431030003@mail.bnu.edu.cn。本文获得国家社会科学基金重大项目(25&ZD274)的资助。本文未使用AI。感谢匿名审稿专家的宝贵意见,文责自负。

倒逼生产生活方式全面革新,以实现“美丽中国”的生态文明建设目标。无论是数字经济发展还是生态文明建设,习近平总书记都非常重视并作出一系列重要论述。针对全球新一轮科技革命和产业变革中数字经济的崛起,习近平总书记指出:“数字经济发展速度之快、辐射范围之广、影响程度之深前所未有,正在成为重组全球要素资源、重塑全球经济结构、改变全球竞争格局的关键力量”^①。因此,“当今时代,数字技术、数字经济是世界科技革命和产业变革的先机,是新一轮国际竞争重点领域,我们一定要抓住先机、抢占未来发展制高点”^②。

数字经济作为继农业经济、工业经济和服务经济之后的新经济形态和主要经济形态,不仅对企业和产业等经济层面产生了全领域、全链条和全周期的深刻影响,而且对社会各个方面的渗透和赋能作用日益加深。实际上,习近平总书记把数字经济的全面影响上升到了“五位一体”数字化的高度。2023年,中共中央、国务院印发的《数字中国建设整体布局规划》,明确提出“推进数字技术与经济、政治、文化、社会、生态文明建设‘五位一体’深度融合”。在生态文明建设上,习近平总书记提出的五大新发展理念中包括了绿色发展理念,明确了绿色发展在经济社会发展中的突出地位,其中“两山论”尤为深入人心。2022年,习近平总书记在党的二十大报告中指出:“我们坚持可持续发展,坚持节约优先、保护优先、自然恢复为主的方针,像保护眼睛一样保护自然和生态环境,坚定不移走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路,实现中华民族永续发展”^③。“要牢固树立和践行绿水青山就是金山银山的理念,坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展,加快发展方式绿色转型,提升生态系统多样性、稳定性、持续性,积极稳妥推进碳达峰碳中和,以高品质的生态环境支撑高质量发展”^④。数字化是发展引擎,绿色化是发展约束,如何实现数字化与绿色化协同(以下简称“双化协同”)发展成为现实关切。对此,习近平总书记从系统、协同、统筹等方法论角度提出了系列重要论述并进行了行动部署。2025年4月,中央网信办、国家发展改革委等十部门联合印发《2025年数字化绿色化协同转型发展工作要点》,对“双化协同”作出系统部署,强调要推动数字产业绿色低碳发展,加快数字技术赋能绿色化转型,发挥绿色化转型对数字产业的带动作用。

在推进绿色化转型与高质量发展的进程中,系统观念和协同治理是贯穿始终的核心方法论。习近平总书记在不同时期的重要论述构建了从特定领域实践到全

① 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第433页。

② 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第435页。

③ 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第454页。

④ 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第484页。

面改革推进的完整逻辑体系,为“双化协同”发展提供了根本遵循。2021年,习近平总书记指出:“实现碳达峰、碳中和是一项多维、立体、系统的工程,要坚定不移贯彻新发展理念,坚持系统观念,处理好发展和减排、整体和局部、短期和中长期的关系,把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局,以经济社会发展全面绿色转型为引领,以能源绿色低碳发展为核心,加快形成节约资源和保护环境的生产方式、生活方式、空间格局,坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路”^①。这一论述聚焦“双碳”目标,确立了系统观念在绿色转型中的认知基础,强调通过统筹多元关系实现结构性优化。2024年在党的二十届三中全会第二次全体会议上,习近平总书记进一步拓展了系统观念的实践维度,强调“坚持系统观念,要统筹兼顾、辩证施策,处理好经济和社会、政府和市场、效率和公平、活力和秩序、发展和安全等重大关系,增强改革系统性、整体性、协同性”^②,将协同治理的要求从绿色转型领域延伸至进一步全面深化改革战略布局,突出了跨领域、跨层级整合的实践逻辑。系统观念与协同治理的方法论共同为理解与推动“双化协同”发展提供了理论与实践依据。一方面,系统观念作为认知基础,揭示了“双化协同”并非简单叠加,而是包含技术迭代、产业转型、制度调整、社会适应等多维互动的复杂系统,二者在赋能节能减排、优化资源配置、重塑产业生态等方面深度耦合,并通过技术、市场与政策的相互反馈持续演进,若孤立推进极易引发政策冲突与长期结构性失衡。另一方面,协同治理作为体制机制创新,正是应对上述挑战的重要改革举措。“双化协同”涉及能源、制造、交通、数据等多领域交叉,与中央与地方、政府与市场、行业与社会等多层级互动,必然要求打破制度性壁垒、整合多元主体、创新政策工具,以形成治理合力。因此,将系统观念贯彻于协同治理之中,正是将“双化协同”发展的系统认知转化为整体效能的根本途径。

当数字化与绿色化从两条并行的发展主线转向深度融合的同一演进赛道,二者能否突破单一维度的发展局限实现协同增效而非彼此掣肘,已成为影响经济社会高质量发展的关键命题。已有研究多聚焦于数字化赋能绿色化的单向路径,强调大数据、人工智能、物联网、区块链等技术在节能减排、资源优化中的作用,却相对忽视了绿色化对数字化的反向约束与重塑(陈星星和田贻萱,2025)。数字化与绿色化并非简单的手段与目的关系,而是一种双向嵌入、螺旋演进的共生关系。二者的协同发展本质上是一种“双重外部性内部化”过程:既将数字技术的环境外部性内部化,也将环境治理的技术外部性内部化。协同论与耗散结构理论为深入揭示二者间的动态耦合机制提供了元理论框架。在复杂系统演化的理论谱系中,哈肯的协同学与普里高津的耗散结构理论共同揭示了系统从无序走向有序的内

① 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第421页。

② 《习近平经济文选》第一卷,北京:中央文献出版社,第539页。

在机制。协同学指出,当多个子系统的序参量趋于一致且其阻尼系数趋同时,系统会发生“支配—伺服”转换,形成宏观有序结构(Haken, 2004)。而耗散结构理论则在“序参量主导系统有序化”的基础上进一步揭示了开放系统实现有序演化的临界条件与触发机制:开放系统必须跨越“熵产生—熵流”的临界阈值才能通过内部涨落打破原有对称性,生成具备自维持能力的新结构(Prigogine, 1975; Prigogine等, 1978)。基于此,可将数字化与绿色化视作一个由双重序参量驱动的非平衡开放系统:数字序参量通过信息扩散与网络外部性降低系统内部熵增;绿色序参量通过外部负熵输入抑制系统对生态的熵扩散。当二者阻尼系数收敛、涨落协同放大,系统便可能在新的“信息—生态”耦合势面上形成耗散结构,即数字化绿色化协同态。

目前,学术界围绕“双化协同”发展开展了多角度、多方法的研究探索。纵观既有文献,其研究脉络可凝练为三大主题:一是“双化协同”发展的理论逻辑与内在机理。栗伊萱和翟云(2025)认为,其理论逻辑植根于发展目标同构、发展要素互嵌以及发展主体重合,并通过“数字赋能—绿色牵引—系统适配”三重路径,呈现技术驱动的绿色升级、集约低碳的技术迭代及融合创新的共生形态。另外两大主题分别是“双化协同”发展的测度方法与空间格局(Wu等, 2025; 彭政钦等, 2025),以及其影响因素与经济后果(李强和唐幼明, 2024; 陈震等, 2024)。既有研究围绕“双化协同”发展开展了大量探索,在数字技术赋能效应(李金昌等, 2023; 曹裕等, 2023)、环境规制政策效应(蒋灵多等, 2025; 郭四代等, 2024)、区域协同时空特征(李慧云等, 2025; 孙博文等, 2025)等方面积累了丰富的实证证据,为本文的研究奠定了坚实基础。本文的创新之处在于:第一,在理论体系构建方面,弥合了微观机理与宏观表现的逻辑断层。本文基于协同论与耗散结构理论,通过序参量(核心驱动因素)、阻尼(约束条件)与涨落(动态扰动)的三重逻辑闭环,既与现有实证研究中已验证的各类影响因素相契合,又将其整合到统一的理论框架中,清晰阐释微观层面的技术应用如何通过动态演化跃迁至中观系统协同与宏观生态协同,使理论逻辑与既有实证结论形成相互支撑,弥补了现有研究的逻辑断层。第二,在发展模式提炼上,基于既有实证结论形成了更具情境适配性的可复制范式。本文基于已被验证的核心影响因素,结合跨区域、跨行业的系统比较,提炼出“技术牵引型—规制驱动型—空间网络型”三维三型典型模式。三类模式分别通过“技术—数据—场景—系统”逐级递进、“规制—价格—风险—声誉”传导链条以及“节点—链路—场域”三重共振机制整合形成模块化范式,其合理性既得到既有实证证据的支撑,又能适配不同区域的资源禀赋特征,解决了既有研究中案例经验难以推广的问题。第三,在实践路径设计上,将理论发现转化为更具可操作性的递进式实践路径。本文基于构建的理论框架与提炼的典型模式,沿着“微观技术—中观制度—宏观空间”的递进逻辑,设计了“技术维度双

向融合+创新突破、制度维度规则构建+机制创新、空间维度梯度布局+跨域协同”的一体化路径。

二、“双化协同”发展的理论逻辑

(一)数字化与绿色化:国家战略框架下的协同发展

“双化协同”推进,是中国式现代化进程中实现高质量发展与高水平保护辩证统一的战略路径,更是构建人与自然和谐共生的现代化新格局的重要支撑。二者相互支撑、协同共进,共同服务于高质量发展与可持续发展的国家战略。第一,这种协同体现为系统集成观在战略层面的顶层设计与机制构建。党的二十届三中全会通过的《中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定》(以下简称《决定》)明确将“更加注重系统集成”作为深化改革的指导思想,强调“处理好经济和社会、政府和市场、效率和公平、活力和秩序、发展和安全等重大关系,增强改革系统性、整体性、协同性”。在生态文明领域,《决定》进一步提出“健全山水林田湖草沙一体化保护和系统治理机制”,要求通过“建设和运营国家数据基础设施,促进数据共享”,将数字化监测网络如卫星遥感、地面站、无人机等嵌入生态保护红线管理,实现从污染防治到碳足迹追踪的全链条集成。例如,《决定》在“深化生态文明体制改革”部分强调实施分区域、差异化、精准管控的生态环境管理制度,健全生态环境监测和评价制度,这种“精准管控”正是依托大数据分析、AI预警等数字化技术对山水林田湖草沙系统的整体性诊断。第二,这种协同体现为数字化技术赋能与绿色化价值导向的深度互构。数字化为绿色化提供精准支撑:《“十四五”生态保护监管规划》依托数字技术构建生态监测网络,实现对生态保护红线、自然保护地的常态化监管;《“十四五”数字经济发展规划》提出通过智慧能源系统优化能源配置,以大数据提升污染防治精准性。同时,绿色化引导数字化可持续发展,数字基础设施需融入绿色设计,数据中心采用可再生能源供电降低碳足迹,数字产业发展需符合“双碳”要求。这种协同,在党的二十届三中全会“着力推动高质量发展,进一步推动和谋划全面深化改革”的部署中尤为凸显,二者共同破解发展与环保的矛盾,推动经济社会发展全面绿色转型。从国家战略全局看,数字化与绿色化是实现社会主义现代化的必然选择。数字化以技术赋能提升全要素生产率,加速培育新质生产力,推动产业结构优化升级;绿色化则以生态优先守住发展底线,推动人与自然和谐共生,保障经济社会可持续发展。在党和国家战略体系下,二者相辅相成、协同共进,共同构筑起高质量发展的“双引擎”,为实现中国式现代化注入强劲动能,为全面建设社会主义现代化强国奠定更加坚实、可持续的发展基础。

(二)“双化协同”发展的内在逻辑

1. 序参量逻辑:数字化与绿色化作为慢变量的双向支配

基于哈肯(Haken)的协同论(Synergetics),复杂系统的宏观有序秩序并非由数量庞大的快变量主导,而是由少数具有演化惰性的慢变量,即序参量(Order Parameters)所支配(Haken, 1983)。当系统趋近演化临界点时,线性稳定性分析揭示了核心规律:绝大多数“本征模”,即系统对扰动响应的时空特征模式,各模态对应特定衰减/增长率与空间结构,仍保持快速衰减状态,仅有极少数本征模呈现临界慢化特征,这类慢化模态即被定义为序参量。而临界点处系统自由度的大幅缩减,使得宏观行为仅由少数序参量控制(Haken, 2004)。依据伺服原理(Slaving Principle),快变量所处的“稳定流形”,即状态空间中收敛至某一稳定定态的轨迹集合,可通过“绝热消去”处理:假定快变量能瞬时响应序参量的变化,其动力学方程可简化为代数关系,而非复杂微分方程。由此,快变量的瞬时取值由序参量的当前值代数决定,序参量通过低维非线性动力学方程主导整个系统的宏观演化进程,筛选出符合系统规律的时空图案,最终实现从微观无序到宏观有序的涌现(Haken, 1983)。

数字化与绿色化正是当代经济—生态巨系统中的一对核心共轭序参量,二者的演化速度远慢于资本流速、价格波动、个体决策等快变量,却能在宏观层面锚定经济—生态系统未来数十年的演化方向。其中,数字化以数据、算力、算法为核心要素,依托摩尔定律驱动的指数级扩张,持续压缩信息摩擦、降低交易成本并放大网络外部性;绿色化则以碳约束、生态阈值、可再生能源替代为核心导向,通过制度化的负熵输入,抑制系统对外部环境的熵增输出。二者虽表现出不同的演化路径,却在更高维度共享“提升全要素生产率并降低单位产出熵增”的宏观目标,由此形成相互耦合的势能面,构成协同演化的核心基础。在这一耦合势能面中,数字化与绿色化呈现出双向支配、互为伺服的动态关系:数字化对绿色化的支配作用体现为“信息负熵”的实时注入。通过物联网感知、大数据预测、人工智能优化等技术手段,数字化将传统“事后治理”的环保模式升级为“事前—事中—事后”全闭环管理,使绿色技术的扩散边际成本递减、边际收益递增,为绿色化提供精准化、高效化的实现路径。而绿色化对数字化的支配作用则体现为“生态负熵”的路径校正。碳定价、能耗双控、ESG评级等绿色规制将原本外生于企业成本函数的环境风险内部化,倒逼数字技术沿着低碳、低功耗、循环设计的方向迭代,抑制其高熵无序扩张的倾向。当二者的相互作用系数(耦合强度)突破临界阈值时,系统将发生“支配—伺服”机制转换:资金流、人才流、物流等所有快变量被强制伺服于数字化与绿色化这两个慢变量设定的宏观节奏,最终形成“数字—绿色”协同的宏观有序模态。在此模态下,数字化不再只是脱离生态约束的“增长加速器”,绿色化也不再仅是独立于技术进步的“发展紧箍咒”,而是互为伺

服、互为增益的共轭序参量,共同推动经济—生态巨系统实现低熵、高效、可持续的演化。

2. 阻尼逻辑:“制度—资本—空间”三维机制

阻尼,在物理学中指系统对扰动能量的耗散能力,在经济社会系统中表现为制度刚性、资本黏性、空间摩擦等多重惯性力的集合,阻碍市场在面临政策、技术或偏好变化等外部扰动时做出瞬时且充分的调整。这类惯性力会逐步耗散外部冲击本应快速释放的能量,导致市场调整路径迟缓、幅度折损,甚至形成路径依赖。数字化与绿色化在经济系统中呈现明显的阻尼特征分化:数字化因网络外部性、规模收益递增与轻资产特征,天然具有低阻尼、快扩散的演化冲动;而绿色化受资产专用性、规制时滞、沉淀成本与路径锁定等因素制约,天然表现出高阻尼、慢响应的演化惰性。当二者的阻尼差异过大,经济—生态系统将出现“快变量拖慢变量”或“慢变量阻塞快变量”的非同步振荡,数字化与绿色化的协同势面也将随之解体。由此,“双化协同”发展的政策设计核心在于动态调谐二者的阻尼系数,使二者的弛豫时间常数收敛至同一数量级。弛豫时间常数(τ)在经济学中可被理解为经济系统受到金融危机、政策变动、技术革命等外部冲击后,价格、产出、失业率等关键变量从失衡状态回归至新长期均衡状态或稳定增长路径的速度。 τ 值越小,系统对外部扰动的响应越迅速,表现为价格弹性高、资源流动快、政策传导顺畅。 τ 值越大,则意味着市场调整速度慢、要素黏性高,制度刚性、资本黏性、空间摩擦与预期惯性等阻尼机制会层层耗散冲击能量,导致调整过程迟缓甚至产生路径依赖。因此,政策设计的核心任务就是通过降低制度交易成本、优化要素市场化配置、提升信息与物流效率等方式将二者的弛豫时间常数动态调谐到同一数量级,从而确保价格信号、资本流动与产能调整同步响应、协同跃升。这一调谐过程需以制度设计为先导,驱动资本响应与空间适配,形成“制度先导—资本响应—空间适配—反馈优化”的动态传导链条,三者并非孤立作用,而是呈现“主导启动—协同适配—反馈迭代”的互动关系。

“制度—资本—空间”三维机制的动态传导过程可概括为:制度先行设定规则→资本跟进响应导向→空间适配集聚资源→三者反馈迭代优化。制度通过矫正“双化协同”发展中的市场失灵构建规则框架,以此启动协同发展的底层逻辑与初始进程;资本通过对制度信号的精准识别与敏感响应优化要素配置方向,进而放大制度设计的政策效能与传导效率;空间通过资源的全域整合与格局重构搭建协同载体,从而夯实数字化与绿色化深度融合的物质基础与空间支撑。三者形成闭环迭代,最终实现数字化与绿色化阻尼系数的动态调谐。唯有在这一传导逻辑下,“双化协同”的经济—生态系统才能逐步进入“可共振区间”,为系统下一步的涨落放大与临界跃迁提供必要的动力学条件。

3. 涨落逻辑:外部扰动的临界放大与相变触发

根据普里高津(Prigogine)的耗散结构理论(Dissipative Structure Theory),开放系统的演化状态与其偏离热力学平衡的程度密切相关:当系统处于“近平衡”区域时,趋于回归热力学平衡态,外部微小涨落会被阻尼效应消解,无法引发结构性变革;而当系统远离热力学平衡且跨越某一临界阈值时,微小的外部涨落会被系统内部的非线性动力学机制持续放大,最终触发宏观有序结构的形成,表现为对称性破缺与相变(Prigogine, 1978; Nicolis 和 Prigogine, 1977; Prigogine, 1980)。这一核心逻辑为解析“双化协同”系统的演化规律提供了关键理论基础。

在“双化协同”系统中,涨落源于技术突变、政策冲击、市场需求漂移、国际规则变化等多维外生变量。而系统能否将这类微观扰动转化为宏观变革,取决于序参量耦合强度与阻尼匹配度:当二者的耦合强度足够高、阻尼差异足够小时,微观涨落不再被系统迅速耗散,而是在耦合势阱中持续积累能量,直至突破系统原有势垒,引发对称性破缺。基于经济学视角,“势阱”对应系统当前所处的相对稳定的局部均衡状态,是既有发展模式下技术、资本、制度形成的稳态结构;“势垒”则代表从旧发展模式向新发展模式转型所需支付的转换成本或变革阻力;“对称性破缺”是系统发生“相变”或“范式革命”的核心节点,标志着旧均衡被打破、新均衡确立,新的主导技术、商业模式或制度规范成为系统演化的核心准则。

“双化协同”系统的原有发展模式本质上是一种稳定的局部均衡,转型过程面临高昂的转换成本,而当外部涨落持续作用且系统内部数字化与绿色化的协同性持续增强时,变革能量会不断累积,推动系统逐步逼近临界阈值。最终,系统会跨越临界点,从多种潜在的新发展路径中不可逆地选定一种主导范式,实现向更高级均衡状态的跃迁。具体而言,一次突发的可再生能源度电成本骤降,可能瞬间改写绿色技术的成本曲线;一项颠覆性的零碳算法发布,可能指数级压缩数据中心的能耗基线;一轮力度空前的绿色金融宽松,可能带来万亿级资本洪峰。上述涨落看似偶然,却在“节拍对齐、阻尼匹配”的背景下产生协同放大效应:绿色电价降低→数据中心负荷曲线外移→算法算力需求激增→零碳芯片规模量产→芯片制造成本下降→更多场景可被数字化改造→绿色技术扩散成本再降,形成正反馈闭环。当这一正反馈强度突破临界阈值时,系统将从局域“技术协同”跃迁至全域“生态协同”,在宏观层面表现为碳排放拐点提前到来、数字红利同步放大、新产业赛道集中涌现。值得注意的是,系统完成跃迁后形成的新耗散结构依赖外部负熵的持续输入才能维持稳定:可再生能源装机容量的稳步提升为系统提供持续动力,绿色资本在技术研发与市场应用间的高效循环为转型注入核心资金,数据要素收益在全社会范围内得到更公平的共享激发广泛参与协作,三者共同构成负熵输入体系,巩固“双化协同”的新兴范式。一旦这类负熵补给中断,系统将退化为高熵的旧有状态,“涨落—放大—跃迁”的正向循环也会随之终结。“双化协同”发展的理论逻辑如图1所示。

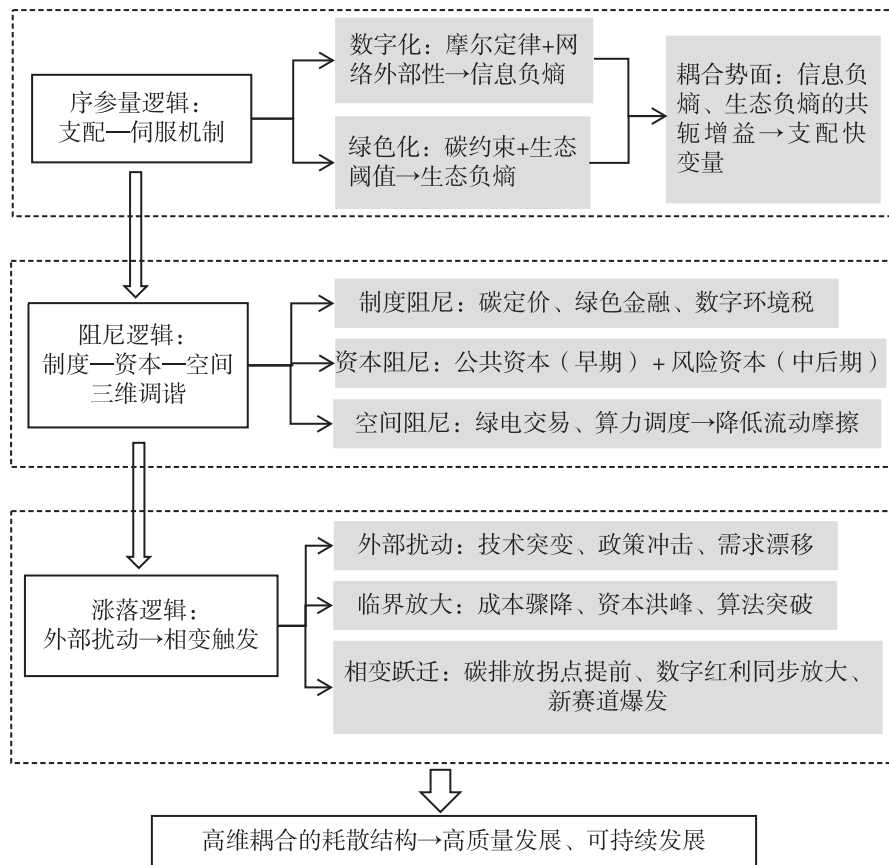


图1 “双化协同”发展的理论逻辑

三、“双化协同”发展的模式

通过对“双化协同”演进的多元动力机制、作用路径及空间形态的系统性解构与凝练,本文总结出“技术牵引型”“规制驱动型”与“空间网络型”三种“双化协同”发展模式。这三类模式的划分并非孤立割裂,而是围绕“要素协同—机制适配—系统跃迁”这一逻辑主线层层递进、互为支撑。一个区域的“双化协同”进程往往是这三种模式在不同发展阶段、不同政策领域以不同权重叠加、演进与互动的结果。三者共同构成了“技术创新筑基—制度设计赋能—空间网络扩容”的逻辑闭环,通过技术扩散的制度适配、制度落地的空间支撑、空间优化的技术赋能形成联动,最终推动数字化与绿色化从局部、碎片化的协同迈向全域、系统性的协同,为不同区域、不同产业根据自身资源禀赋与发展阶段选择适配的“双化协同”路径提供了理论框架与实践指引。

(一)技术牵引型:以数字技术为轴心的“绿色跃迁”

技术牵引型“双化协同”发展模式的触发逻辑源于数字技术本身所蕴含的革命

性驱动力。该模式并非由外部政策或市场压力被动引发,而是肇始于底层数字技术群的原始创新与突破性进展。当高能效芯片、零碳算法、分布式算力网络等关键组件在实验室阶段被验证具备数量级提升能源与碳效率的潜能时,一种内源性的、以技术为轴心的“绿色跃迁”便具备了初始动能。其核心演进路径呈现出清晰的“技术—数据—场景—系统”逐级递进与放大效应,即一项关键技术突破后,首先转化为可感知、可计算的数据流,继而渗透并重塑具体应用场景的运行逻辑,最终引发整个产业系统或能源系统的范式变革。

这一模式的核心在于数字技术对传统绿色转型路径的深刻重构,使得原本依赖于末端治理和粗放管理的绿色化进程转变为基于实时感知、精准预测与动态优化的闭环智能控制体系。该模式的作用机制在两个维度展现:在单点改进与系统集成层面,通过将数字孪生、大数据与人工智能等技术嵌入能源、制造、建筑、交通等碳密集型场景,实现了从“事后治理”到“事前—事中—事后”全流程优化的转变。例如,在能源系统中,人工智能提升新能源发电预测精度,直接增强了电网的消纳能力;数字孪生技术构建虚拟电网进行并网模拟,有效降低了实体系统试错的风险与成本。河钢集团为此提供了极具代表性的实践范本。其构建的国家级工业互联网平台 WeShyper,依托物联网、边缘计算等核心技术,打造了 CManage 碳数据管理与 CTrace 碳足迹监控等子系统,实现了对钢铁生产全流程的精准算碳与智慧降碳。更进一步地,河钢通过与西门子公司合作部署 MindSphere 操作系统,利用数字孪生技术优化冷轧产线,实现了柔性生产与能效提升。同时,与特诺恩公司(Tenova)合作开发的全球首例120万吨氢冶金示范工程更是以“焦炉煤气零重整竖炉直接还原”这一颠覆性工艺大幅削减了二氧化碳排放量,这标志着数字技术与绿色工艺的深度融合正从流程优化迈向根本性的工艺革命。在系统演进与生态构建层面,该模式通过“技术—数据—资本”的正反馈循环,催生出零碳数据中心、碳管理 SaaS 平台、低功耗 IoT 芯片集群等新兴绿色赛道。这些新业态不仅自身具备低熵特性,更能为经济系统的其他子系统持续输入负熵流,从而触发“技术扩散—规模收益递增—成本曲线陡峭下降”的连锁反应,最终推动协同效应从局部的、技术性的协同跃迁至全域的、生态性的协同。河钢规划打造的“5+1”绿色转型示范区,集氢冶金、新能源、新材料、数字科技与智能制造、科技创新五大园区及产城共融示范区于一体,旨在构建一个功能互补、协同联动的区域级“双化协同”生态系统,深刻揭示了从技术单点应用向全域生态协同的跃迁过程。

该模式的主要效果并非单一技术的应用或个别指标的改善,而是宏观碳排放强度的峰值拐点早于政策预期时间节点出现,且伴随碳排放强度下降,数字化带来的全要素生产率提升与绿色化释放的生态效益能够同步放大、相互强化。二者通过“技术迭代—成本下降—市场扩张—再投资”的闭环机制,最终形成自我驱动、自我提高的“技术—经济—环境”正反馈循环。在此模式下,制度与空间要素主要扮

演“加速器”与“孵化器”的角色。碳定价、绿色金融等政策工具的核心作用在于待技术势能充分积累后为其提供系统阻尼匹配与市场转化动力,从而加速技术规模化应用与范式转型进程。因此,技术牵引型发展模式的典型代表为创新要素高度密集、知识外溢效应显著的高新技术产业园区或类似“硅谷”的创新生态群,这些区域以其独特的集聚效应有效地催化了从技术突破到产业革命的整个链条。

(二) 规制驱动型:基于政策杠杆的“协同倒逼”

规制驱动型“双化协同”发展模式的触发逻辑源于外生性的高强度规制信号,其起点并非内源性的技术突破,而是由政府或监管机构所设定的、具有强制性与可预期性的政策框架。该模式的核心内容在于通过构建包含碳定价、能耗双控、强制性信息披露与绿色金融导向在内的制度体系,将环境负外部性内部化为企业的运营成本与投资决策,从而重塑市场运行的边际条件:传统数字化扩张路径的边际成本明显增加,绿色化投资的边际收益相对陡增。这一制度设计将数字化与绿色化这两个原本可能异步发展的“序参量”同步化,引导其走向协同共振。

该模式的作用机制体现在“规制—价格—风险—声誉”政策传导链条上。第一,阶梯式碳价或碳税等工具直接提高了高耗能数字基础设施的运营成本并形成经济压力,迫使企业寻求低功耗芯片与绿电直供等技术解决方案。第二,强制性的环境信息披露规则将企业的碳足迹转化为可量化的金融风险,进而影响其融资成本,倒逼资本市场将资金更多地配置于低碳数字技术领域。第三,ESG评级体系与绿色债券目录等工具则将企业的环境表现与其声誉资本、品牌价值及资本成本直接挂钩,在市场中形成“绿色溢价”与“棕色折价”的剪刀差。在这一系列制度势阱的约束与引导下,数字化企业为了降低日益增长的制度摩擦成本,会主动引入绿色技术以优化其能耗结构;而绿色企业为了在竞争中获得优势,则会主动采纳数字工具以提升其运营效率与管理精度,二者最终在制度框架内实现“相向而行”。中国济南市自2022年11月启动的“数字化绿色化协同转型发展综合试点”可谓规制驱动型“双化协同”发展模式的典范。该试点以制度设计为先导,通过“政策杠杆—数字治理—绿色指标”机制实现了从规制信号发布到技术扩散跃迁的闭环验证:市政府发布《济南市数字化绿色化协同转型发展综合试点实施方案》等纲领性文件,将单位GDP能耗、数据中心电源使用效率(PUE)、可再生能源比例等刚性约束指标纳入区县年度考核,并对达标企业在土地、用能、信贷、税收等方面给予阶梯式优惠。

该模式的主要效果在于绿色技术采纳曲线在规制信号发布后呈现出典型的“J”型陡升态势,且规制强度与技术扩散速度之间维持着稳定而明显的正相关关系。所谓“J”型陡升,是指绿色技术在市场中的采纳率随时间呈现“低平—拐点—近乎垂直上升”的三段式轨迹。该模式下,这一轨迹并非市场自发演进的结果,而是规制信号强度与可信度的直接映射,是对政策信号强度与市场响应速度之间函数关系的精确刻画:横轴为规制力度(如碳价、能耗限额、信息披露要求等),纵轴为

绿色技术在目标行业中的渗透速率,二者在临界阈值附近出现明显的非线性拐点。当规制力度低于阈值时,企业处于“观望—等待”状态,技术扩散近乎停滞,曲线保持低位平坦;一旦规制力度越过阈值,边际合规成本骤然上升,绿色技术的相对净收益迅速放大,企业为避免未来更高的合规成本,会在极短时间内集中部署新技术,导致采纳率指数级攀升,形成“J”型曲线。然而,这一理想轨迹的实现,高度依赖于政策环境的“可信度”与“一致性”。若碳价因宏观政策调整或财政压力而发生频繁波动,或信息披露标准在地区间、部门间存在显著差异,企业将难以形成稳定的收益预期,进而更倾向于采取非技术性应对策略,最终导致制度成本被不必要地放大,协同进程因此受阻。此时,原本用于加速技术扩散的政策杠杆反转为抑制因子,绿色技术采纳曲线可能由“J”型退化为“L”型甚至倒“U”型,协同节奏随之失配。因此,规制驱动型对政策的时间一致性(逐年递增且可预测)、空间一致性(跨区域标准统一)与口径一致性(信息披露与执法尺度对齐)提出了极高要求,任何细微波动都可能通过非线性放大机制,将政策红利转化为政策噪声,最终抑制数字化与绿色化的协同跃迁。基于此,规制驱动型“双化协同”的典型代表通常与执行力强且统一环境规制的国家级或区域性行政单元高度重合。例如,实施了“碳税—绿电—数字一体化”政策的丹麦,或推行了“绿色新政”的欧盟,这些区域通过顶层的制度设计,为数字化与绿色化的协同发展提供了稳定的宏观场域。

(三)空间网络型:以区域一体化为载体的“共振扩散”

空间网络型“双化协同”发展模式的触发逻辑在于通过系统性降低跨区域的时空与制度摩擦,构建一个能够促使能源、数据、资本等要素高效联动与协同配置的“共振场域”。该模式的启动并非依赖于单一技术突破或强制性政策,而是肇始于对地理邻近性、基础设施互联互通以及区域制度一体化的战略性规划与投资。当跨区域的绿电交易机制得以建立、一体化算力调度网络初步成型、共享型储能设施广泛布局,以及统一的碳排放在线监测平台搭建完毕时,一个覆盖物理空间与虚拟网络的“高效耦合场域”便基本形成,为数字化与绿色化在更大空间尺度上的协同共振奠定了结构性基础。

该模式的核心内容聚焦于如何在这一场域中实现异质性要素的深度耦合与跨域循环。从实践路径看,其要素耦合呈现三大关键形态:一是能源与算力的跨域匹配,即能源互联网依托特高压直流输电、虚拟电厂技术及区块链绿电溯源凭证,将西部富余的风电、光伏等可再生能源实时输送至东部高算力负荷的算力中心,实现“绿电供给—算力需求”的空间资源优化配置,从根本上破解区域能源禀赋与数字产业布局的空间错配难题。二是数字与热力的局域循环,通过回收数据中心运行产生的巨量“数字废热”,并经由管网系统输送给周边的工业园区或社区用于工业流程与冬季供暖,从而将原本无序耗散的能量转化为有价值的“绿色热源”,在局部范围内构建起能量循环利用的“负熵闭环”。三是碳与数据的跨域流

通,即通过区域碳市场与数据交易所的规则互认与系统互联,推动碳资产与数据资产在统一大市场内进行定价与交易,显著提升这两类新兴要素的流动性及其配置效率。

实现该模式的关键在于构建“节点—链路—场域”三重共振机制。节点机制以城市或产业园区为载体,通过统一技术标准接口实现数字基础设施与绿色设施的“可插拔式”无缝对接,确保各类设施能快速融入协同网络。链路机制推动能源网、信息网、交通网与金融网的多网深度融合,通过跨域协议互认与智能化算法定价有效降低要素流动的边际耦合成本,提升链路传导效率。场域机制依托区域一体化制度框架,通过建立共享储能调度平台、跨域能源联合调度机制与协同碳监管体系等打破行政壁垒,实现要素跨域协同的常态化与制度化运作。当要素耦合强度超越特定临界阈值时,系统将触发“规模—网络—制度”三重正反馈效应,驱动协同发展路径向纵深拓展。第一,规模正反馈体现为网络节点数量的增加与节点承载能力的提升带动单位要素耦合成本的持续下降。例如,在长三角生态绿色一体化发展示范区,光伏、储能等分布式能源设施按统一标准接入区域能源互联网后,随着接入规模的扩大,调度与运维的边际成本显著降低,提升了清洁能源的整体消纳率与经济性。第二,网络正反馈表现为链路连接密度与智能调控能力的增强,促进能源、数据、资金等要素配置效率的系统性提升。例如,“东数西算”工程通过构建全国一体化算力网络,依托高速直连网络与智能调度算法实现算力资源跨区域高效调配,在降低数据中心能耗的同时提升了数据要素的流转效率与价值产出。第三,制度正反馈则依托跨域治理体系的不断完善,通过规则互认、监管协同与利益共享机制有效减少政策套利空间,激励长期合作。例如,京津冀区域通过建立大气污染联防联控与碳排放权跨区域交易试点,统一监测标准与配额分配机制,增强了区域环境治理的整体性,引导要素向低碳领域集聚。三重正反馈相互强化,推动系统从局部协同走向全域融合,最终形成要素高效循环、动态平衡的协同耗散结构。这一过程不仅体现为宏观层面的区域均衡,更通过具体的设施联通、网络智能演进与制度创新实践,为空间协同发展提供了可持续的实施路径。

该模式的主要效果可以从宏观绩效与区域均衡两个维度观测。在宏观绩效层面,体现为区域碳强度、算力密度与人均GDP在统一空间梯度上实现协同优化,在降低环境压力的同时提升数字动能与经济产出,达成“降碳、增算、提质”三重目标。例如,长三角生态绿色一体化发展示范区通过建设区域级数字能源协同平台,在2020~2023年间实现了单位GDP碳排放年均下降约5%、算力设施密度提升30%,同时人均GDP保持同步增长,体现了减排、数字化与经济发展在区域层面的正向联动。在区域均衡层面,表现为核心城市与周边腹地数字基础设施覆盖率、绿色能源可及性以及产业协同收益等关键维度的差距明显收敛,从根本上克服“核心一边

缘”的发展悖论,最终实现“全域协同、共同受益”的“双化协同”转型目标。例如,广东省通过“湾区绿电共享计划”与跨区域输电网络,将珠三角的清洁能源需求与粤东西北的可再生能源供给高效对接,使后者的可再生能源消纳比例在三年内提升约12个百分点,接近珠三角平均水平,初步打破了能源资源与负荷中心的空间错配,推动了区域间的绿色协同收益共享。

该模式作为当代城市群发展的典型范式,其核心特征在于突破单一中心结构,构建多中心、扁平化、强联结的功能性网络体系。这一模式在长三角、粤港澳大湾区及欧洲莱茵—鲁尔区等实践中表现为以高速交通、数字基础设施与生态廊道构成的复合网络,实现生产要素、创新知识与绿色技术在区域内的动态配置与协同循环。同时,以跨行政边界的制度协作与治理创新推动数字化与绿色化在产业转型、空间格局与社会治理中深度融合,形成“技术—制度—空间”共振的协同发展路径。综上所述,“双化协同”发展三大典型模式如图2所示。

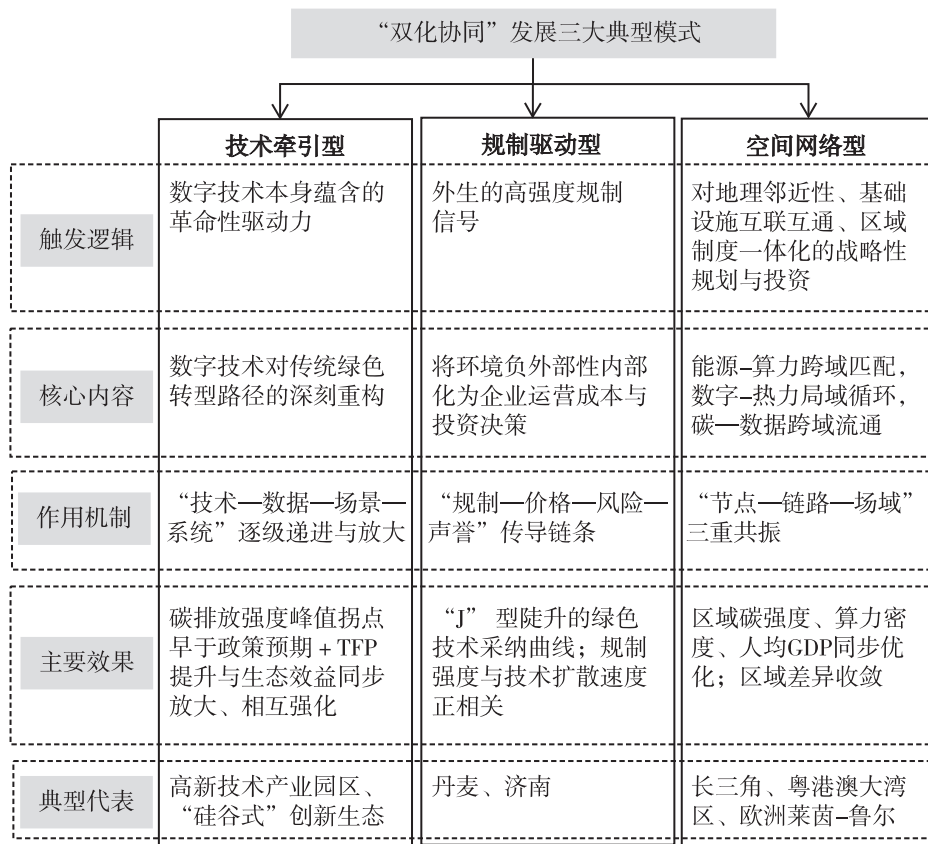


图2 “双化协同”发展三大典型模式

(四)模式间的互动关系与复合演化

“技术牵引型”“规制驱动型”“空间网络型”三类“双化协同”发展模式在理论建

构层面虽呈现出逻辑层次上的分野与侧重,然而在现实演进过程中,三者绝非彼此孤立、静态并列,而是共同构成了一个具有内在耦合性、动态转化性与系统演进性的复合范式体系。这一体系的核心特征体现为:技术突破、制度建构与空间重组三者之间存在着深刻的相互催化、互为支撑与螺旋强化的协同关系,共同推动数字化与绿色化从局部适配走向系统融合。具体而言,技术牵引往往为规制工具的有效实施与空间网络的智能运行提供底层支撑与可能性边界,例如高精度传感与物联网技术使得碳排放的实时监测与可信核查成为可能,进而为碳定价、绿色金融等规制手段奠定了可操作、可审计的技术基础。而缺乏此类技术赋能,许多环境规制将难以超越宏观统计与事后核算的局限,其政策传导的精准性与效果将大打折扣。与之相应,强有力的规制框架则通过设定明确的市场信号与合规约束,为新兴绿色数字技术创造了稳定的需求预期与商业化通道,从而加速技术从实验室创新走向规模化扩散的进程。如果缺乏持续且可信的制度承诺,仅凭技术自身的内生动力往往难以突破市场失灵与路径依赖的桎梏,易陷入“创新孤岛”的困境。空间网络型模式则进一步将技术与制度的互动关系置于具体的区域载体与地理尺度之上,其本质可视为前两种模式在空间维度经过深度融合后所外显的高级形态与系统集成。它既依赖于跨域互联互通的基础设施(技术集成)与协调统一的制度安排(规制协同)作为其构建前提,又通过形成要素高效流动、功能互补嵌套的网络化结构,反向为更高层级的技术协同创新与更复杂精细的制度设计提供了试验与赋能平台。三者之间形成了“技术赋能规制落地—规制拉动技术扩散—技术与规制共同形塑空间—空间网络反哺技术与制度创新”的递归强化循环。

进一步从动态演进的视角来看,一个区域的“双化协同”路径往往呈现为不同模式主导下的阶段递进或多种模式特征交织的复合叠加态。在协同进程的初期,常见以“规制驱动型”作为破局起点,通过强有力的行政指令或市场机制设计快速扭转资源环境价格扭曲的现状,倒逼经济主体寻求节能降碳的数字化解决方案,从而激发“技术牵引型”因子的萌发与生长。随着特定绿色数字技术赛道逐渐成熟并形成集群优势,该区域可能进入以“技术牵引型”逻辑为主导的发展阶段,依靠创新驱动的比较优势参与更大范围的市场竞争与合作。而当技术积累与制度创新达到一定阈值且区域一体化战略提出更高要求时,推动能源、数据、资本等要素在更大地理范围内优化配置的“空间网络型”模式便成为自然演进的方向,旨在通过构建跨行政边界的功能性网络实现协同效益的规模化与普惠化。

四、“双化协同”发展的路径

“双化协同”发展并非单一领域的线性推进,而是技术创新突破、制度体系保障与空间格局优化相互耦合、动态适配的系统工程。从“技术—制度—空间”三个维度解构其发展路径,既能明确各维度的核心任务,更能凸显三者间的协同逻辑,为

全域性、深层次的“双化协同”提供可落地的实践框架。“双化协同”发展路径如图3所示。

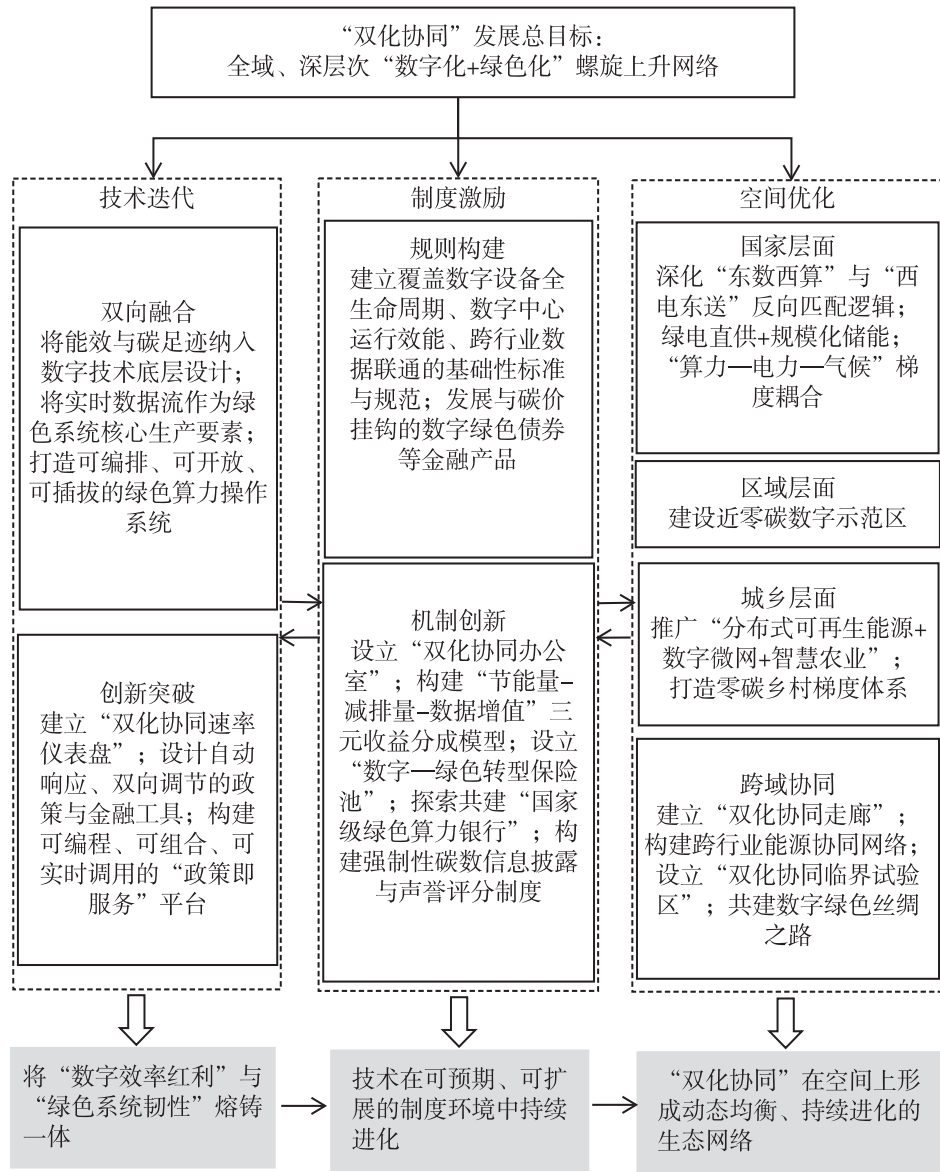


图3 “双化协同”发展路径

(一)技术维度:以“双向融合+创新突破”构建“双化协同”的核心驱动力

以“双向融合+创新突破”构建“双化协同”的核心驱动力,关键在于将数字化与绿色化从“并行”转变为“互嵌”的螺旋上升过程,让两大层面的技术体系深度渗透、相互赋能,而非简单叠加。在双向融合层面,一方面,所有数字技术的研发与应用必须将能效与碳足迹纳入底层设计逻辑,将能源消耗、碳排放指标与算力、带宽、时延等核心性能指标置于同等重要的位置,覆盖芯片研发、算法优化、网络搭建、数据

中心运营、终端设备生产全链条。例如,在芯片设计阶段引入低功耗架构,在算法开发中融入能耗优化逻辑,数据中心通过液冷与浸没式散热技术降低冷却能耗、依托动态功率调度实现算力需求与能源供给的精准匹配,借助AI驱动的需求预测与任务卸载技术,合理分配算力资源,从根本上打破“比特”扩张必然带来“瓦特”线性增长的传统模式,让数字技术的迭代始终伴随能源效率的提升。另一方面,所有绿色系统的建设与运行都需要将实时数据流作为核心生产要素,通过数字化手段破解绿色发展过程中的随机性、不可控性难题。无论是可再生能源的消纳、储能设备的调度,还是碳捕集技术的应用、循环经济体系的搭建,都需借助物联网、区块链、数字孪生和生成式AI等技术,将物理环节全面映射为可计算、可优化、可交易的数字镜像,将风光出力的随机性转化为可预测的发电曲线,将负荷的弹性转化为可调节的用能需求,将储能的时移价值转化为可精准调度的系统韧性,让绿色系统的运行效率依托数字化技术实现质的提升。

在创新突破层面,需构建能够实时监测、动态调控“双化协同”进程的机制与工具,以制度创新保障技术路径的落地效率与整体协同。第一,应建立国家级“双化协同速率仪表盘”,整合算力利用率、数据中心能效、可再生能源占比、碳市场行情等多维高频数据,对数字化进展与绿色化成效进行同步跟踪与耦合分析,为宏观决策提供即时、精准的依据,以便动态校正二者在发展节奏上可能出现的错位,避免数字扩张脱离碳约束或绿色转型滞后于技术迭代。第二,需设计能够自动响应、双向调节的政策与金融工具,形成嵌入碳约束与算力需求的对称式稳定机制。例如,当算力增长持续超过碳排放下降速度时,可自动触发绿色投资准备金要求,引导新增算力基础设施配套低碳能源;反之,当碳价上升抑制合理算力需求时,则可启动专项融资支持节能改造与清洁能源配套,防止运动式减碳拖累数字化转型。此类机制能够将技术突破与市场波动转化为系统内生的调节信号,促进数字加速度与绿色减速度在长期动态中实现均衡。

在实践层面,已有部分企业率先开展了有益探索。例如,河北港口集团通过数字化改造与绿色技术应用相结合,在煤炭装卸环节构建全流程抑尘体系,推广纯电动车与混合动力拖轮,并利用数字孪生与自动化控制系统提升作业效率与能源管理水平,实现了“运煤不见煤”与运营降碳的协同,为传统港口绿色转型提供可借鉴的路径。再如,制造业中的美心集团则以智能化改造与产品生态设计为主线,通过AI视觉监控、全过程能耗管控、屋顶绿化碳汇以及环保材料替代等多维举措,构建了覆盖生产、环境与产品的绿色制造体系,证明了传统制造业通过“数字化+绿色化”实现降碳增效的可行性。这些案例虽行业不同,但共同凸显了技术融合与系统创新在“双化协同”中的核心作用,为更大范围的产业转型提供有力参考。总之,“双化协同”的深化需依靠技术融合与创新突破的双轮驱动。只有在数字设计中内置绿色基因,在绿色系统中嵌入数字智能,并配以敏捷、精准、协同的治理机制,才

能真正构建起数字与绿色相互赋能、螺旋上升的新发展格局,推动经济社会在高质量发展的轨道上行稳致远。

(二)制度维度:以“规则构建+机制创新”筑牢“双化协同”的保障体系

以“规则构建+机制创新”筑牢“双化协同”的保障体系,其核心在于通过系统化的制度设计,将“双化协同”过程中产生的正负外部性有效内部化,把技术、市场与政策中的不确定性纳入稳定可预期的制度框架,从而使技术迭代、产业发展与商业可持续在统一的轨道上相互促进、相向而行。在规则构建层面,首要任务是建立覆盖数字设备全生命周期、数据中心运行效能以及跨行业数据联通的基础性标准与规范。这包括推行数字设备能耗与碳足迹标签制度、建立绿色数据中心分级评估体系、制定跨行业的碳一数共享目录及接口标准等,从而把传统上难以核算的“黑箱排放”转变为清晰透明的“环境账本”。例如,浙江省自2021年起持续迭代升级“工业碳效码”,通过政府部门牵头制定计算与分级标准,并逐步打通不同部门间的数据共享与互认机制,将碳效评价内嵌到产业、金融、土地等政策体系中。截至2024年11月,该省已有6.3万家规上工业企业完成评级赋码;同年推出的3.0版本进一步拓展至产品碳足迹的数智化监测,利用大数据、云计算等技术实现碳排放的全流程可追溯,为企业节能降碳提供了精准指引。同时,金融规则创新也至关重要,应大力发展与碳价挂钩的数字绿色债券、转型再贷款、碳减排支持工具等金融产品,引导资本在风险可控、收益可预期的条件下流向“双化协同”项目。中国人民银行的碳减排支持工具便是一个成功范例,截至2024年6月,该工具余额已超5000亿元,带动碳减排贷款发放超1万亿元,年度碳减排量近2亿吨。在这一工具支持下,工商银行向京东云廊坊液冷数据中心提供专项贷款,助其通过液冷与数字孪生技术实现能效大幅提升;兴业银行则发行挂钩碳价的绿色债券,为碳管理科技企业提供融资,推动数字化减碳服务的规模化应用。

在机制创新层面,需构建多层次、多维度的协同治理与激励相容体系。第一,应在国家层面设立由国家发展改革委、工信部、生态环境部等多部门共同参与的“双化协同”办公室,探索“监管沙盒+动态清单”的柔性治理机制,允许地方在限定范围内开展新技术、新模式试点,在风险可控的前提下实现政策的渐进式优化。第二,要构建“节能量—减排量—数据增值”三元收益分成模型,将经过核证的节能实物量、碳减排量以及由实时数据衍生的增值收益合并为可交易、可贴现的收益池,并按照约定比例在设备商、用能企业、服务商、数据运营商与金融机构之间进行分配,从而激励各方共享协同红利、共担创新风险。第三,可考虑设立“数字—绿色转型保险池”,对因技术路线快速迭代、碳市场波动等因素导致的资产搁浅风险提供保险或再保险,以市场化机制平抑不确定性,增强企业长期投入的信心。

(三)空间维度:以“梯度布局+跨域协同”优化“双化协同”的空间格局

以“梯度布局+跨域协同”优化“双化协同”空间格局的核心在于用空间差异

换取整体效率提升,通过跨区域协作化解资源约束,最终将不同区域的资源禀赋差异转化为全域协同的增益效应,让“双化协同”在空间维度形成动态均衡、持续进化的生态网络。梯度布局旨在根据不同区域的资源承载能力、产业发展需求与生态禀赋特征,实现数字化与绿色化要素的精准适配;跨域协同则是通过制度设计与机制创新,打通要素跨区域、跨行业流动的壁垒,二者相辅相成,共同构建“双化协同”空间体系。在国家层面,应持续深化“东数西算”与“西电东送”的反向匹配逻辑,引导高耗能数据中心、人工智能训练集群等优先向可再生能源富集、气候条件适宜的西部地区布局,通过绿电直供和规模化储能调节算力负荷波动。

在区域层面,重点在长三角、粤港澳、京津冀等数字经济发展高地建设近零碳数字示范区,系统性推进数字技术赋能城市、港口与制造业绿色转型。例如,粤港澳大湾区通过虚拟电厂平台整合分布式储能、充电设施等资源,结合智慧能源管理系统对园区电、热、水等能耗进行实时监测与优化调度,实现了区域能源的柔性平衡与高效利用。

在城乡层面,可依托县域单元推广“分布式可再生能源+数字微网+智慧农业”模式,促进农村屋顶光伏、生物质能源等就地开发与消纳,打造零碳乡村的梯度体系。例如,青海互助土族自治县班彦新村通过建设光伏微电网支撑特色产业低碳发展,实现了村民增收与零碳转型的双重效益;“中国白茶第一村”浙江安吉黄杜村推动茶产业完成绿电交易,为其特色茶产业贴上“零碳标识”,积极探索绿色能源赋能乡村产业的新路径。

在跨域协同层面,需突破行政区划限制,构建多层次、网络化的协作机制。第一,可探索升级“东数西算”工程,建立“双化协同走廊”,通过设计“空间梯级税”等机制促进算力需求与西部绿电、碳汇资源的深度耦合。例如,以跨省算力流量、输送距离及电力碳强度为依据征收专项税费,并将收入定向用于输出地可再生能源与生态建设,从而激励东部地区优先使用西部绿电,带动西部持续降低电网碳强度,形成“绿电促进算力集聚、算力收益反哺绿色转型”的跨区域正循环。第二,应积极构建跨行业能源协同网络,推动数字基础设施余热资源化利用。例如,在长三角生态绿色一体化发展示范区内,上海青浦、江苏吴江、浙江嘉善已着手共建电力数据共享平台,推动应急互济与调度协同。又如,河北怀来云数据中心将余热回收用于周边小区供暖,实现了数字废热向城市热源的转化。

在国际合作中,中国可依托“一带一路”倡议,推广“光伏+数字运维”“储能+云平台”等系统级绿色解决方案,助力共建数字绿色丝绸之路。从阿联酋的马克图姆太阳能公园、艾尔达芙拉光伏电站,到阿联酋风电示范项目,中国在项目设计、建设与运营中输出的不仅是先进的设备与技术,更是形成了数字化管理的绿色基础设施体系,为全球碳中和进程贡献了中国智慧与合作范式。

五、研究结论与政策建议

随着新一轮科技革命和产业变革加速演进,“双化协同”并进是以数据智能提升全要素生产率,以绿色创新降低生态足迹从而实现经济社会高质量发展的共赢之举。本文以习近平经济思想和习近平生态文明思想为指引,将协同论与耗散结构理论嵌入经济学框架,系统阐释“双化协同”发展的理论逻辑、典型模式与实施路径。“双化协同”的内在逻辑是将二者视为互为条件的耦合约束,经“制度—资本—空间”调节机制,触发系统从“局部协同”跃升至“全域协同”,形成可持续增长路径。典型模式方面,研究提炼出以下三种“双化协同”发展模式:一是以“技术—数据—场景—系统”的层级放大效应为核心的“技术牵引型”发展模式;二是基于“规制—价格—风险—声誉”传导链条的“规制驱动型”发展模式;三是依托“节点—链路—场域”三重共振的“空间网络型”发展模式。实践路径方面,本文从“技术—制度—空间”三个维度解构其实践路径:在技术维度,以“双向融合+创新突破”构建“双化协同”的核心驱动力;在制度维度,以“规则构建+机制创新”筑牢“双化协同”的保障体系;在空间维度,以“梯度布局+跨域协同”优化“双化协同”的空间格局。

基于“双化协同”内在逻辑、典型模式与实践路径的研究结论,为进一步推动数字效率提升与绿色收益反哺相互强化的可持续增长,从财税金融政策体系、基础设施建设、治理机制创新三个维度提出如下建议。

一是构建精准化、多层次的财税金融政策体系。为推动“双化协同”发展走深走实,构建系统完备、激励相容的财税金融政策体系至关重要,既能避免一般性补贴导致的资源低效配置,又能精准撬动市场主体参与“双化协同”的内生动力。在财政资金支持层面,建议借鉴欧盟“下一代欧盟”复苏计划中定向支持绿色与数字转型的机制设计,设立国家级“双化协同”专项基金,资金投放重点向高校、科研机构及创新平台倾斜,聚焦智能电网、绿色算力中心、循环经济数字平台等关键领域的基础研究与技术攻关,同时通过地方配套资金联动机制,引导资金向东部制造业数字化低碳改造、西部清洁能源数字化管控等区域特色“双化协同”场景倾斜。需完善可持续金融框架,破解绿色金融的数据瓶颈,建立全国统一的“双化协同”项目评估标准与数据披露体系,推动银行、基金等金融机构开发“数字+绿色”复合型金融产品,如“双化协同”专项绿色债券、数字化低碳转型信贷产品,同时积极引入“耐心资本”,通过政府引导基金与社会资本合作(PPP)模式,为“双化协同”项目提供长期稳定的资金支持,尤其针对数字技术赋能传统高耗能行业绿色转型的中长期项目,设置灵活的还款周期与利率调整机制,保障项目全生命周期的资金需求。

二是构建全域覆盖、智能互通的基础设施体系。“双化协同”的落地见效依

赖于功能完备、数据互通的基础设施体系,需打破“数据孤岛”与“区域分割”壁垒,构建覆盖硬件底座、感知网络、平台体系的全维度基础设施布局。在硬件基础设施建设上,应聚焦“绿色低碳”与“智能适配”双重目标,加速布局绿色算力中心,依托“东数西算”工程优化全国数据中心布局,推动东部算力需求与西部清洁能源资源的精准匹配。在感知网络构建层面,需整合生态环境、工业生产、交通物流等领域的监测设备,搭建全国一体化的“双化协同”智能感知网络。借鉴山东省生态环境智能感知“一张图”的建设经验,综合运用物联网、卫星遥感和无人机等技术,实现对碳排放、污染物排放、资源消耗等数据的24小时连续采集、跨部门互通与智能分析,形成覆盖全国的“空天地”一体化监测体系,为“双化协同”决策提供跨层级、跨区域的“双化协同”管理平台整合,以中央网信办等十部门发布的《数字化绿色化协同转型发展实施指南》为遵循,构建国家级“双化协同”综合管理平台,打通各地方、各部门的专项平台数据接口,统一数据标准与交换规则。重点强化碳足迹管理、循环经济数字护照、生态环境智能预警等核心功能,如参照欧盟《新电池法案》中电池数字护照的标准,建立全品类工业产品与消费品的碳足迹数字档案,实现从生产到消费全链条的数字化低碳管控。

三是强化多元协同、全域联动的治理机制创新。“双化协同”作为跨领域、跨学科的系统性工程,需以多元协同的治理机制为制度保障,推动形成政府、企业、社会多方联动的发展格局。在治理机制创新层面,必须强化系统设计与执行效能。第一,压实政府主体责任,建立跨层级、跨区域的联动工作机制,将“双化协同”成效纳入地方高质量发展考核体系,明确各部门在政策制定、项目落地、监督评估等环节的职责边界,避免权责交叉与政策空转。第二,创新企业监管模式,构建以环保信用为基础的企业监管体系,将企业“双化协同”改造进度、数据披露质量、低碳转型成效等纳入信用评价指标,对信用等级高的企业给予政策倾斜,对未达标企业实施差异化监管,形成强大市场推力。第三,深化国际合作机制,积极利用APEC、中国—东盟、“一带一路”数字经济合作等平台,加强在政策对话、共同研发、技术标准互认与联合示范项目上的协作。在此过程中,既要引进国际先进技术与管理模式,也要主动输出中国在数字生态文明建设中的成功实践,不断提升中国在全球“双化协同”治理体系中的话语权与影响力。

参考文献

- [1]曹裕,李想,胡韩莉,等.数字化如何推动制造企业绿色转型?——资源编排理论视角下的探索性案例研究[J].管理世界,2023,(3):96~112+126+113.
- [2]陈星星,田贻萱.数字化绿色化协同转型的理论阐释与未来路径[J].工业技术经济,

2025, (11): 96~104.

[3]陈震,黄琳芮,吴年年,等.行业溢出视角下绿色债券发行对企业 ESG 的影响研究[J].中国经济学,2024,(3):223~250+335~336.

[4]郭四代,文洋,雷高文,等.用能权交易制度提升城市绿色全要素能源效率:理论分析与中国实践[J].中国经济学,2024,(3):147~183+330~332.

[5]蒋灵多,赵晓静,张国峰.制度为绿色护航:知识产权制度完善与绿色贸易发展[J].数量经济技术经济研究,2025,(9):115~137.

[6]李慧云,刘倩颖,罗峥汉,等.企业数字化绿色化协同转型发展水平测度与时空演进[J].统计与信息论坛,2025,(10):14~28.

[7]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,(9):27~49.

[8]李强,唐幼明.信息消费何以提升城市数字化绿色化协同绩效[J].经济评论,2024,(5):108~124.

[9]栗伊萱,翟云.迈向数字化绿色化协同转型发展:理论逻辑、实践机理与政府角色[J].电子政务,2025,(7):2~15.

[10]彭政钦,王定祥,万妍辰.中国工业数字化与绿色化协同发展水平测度与评价[J].统计与信息论坛,2025,(4):32~47.

[11]孙博文,杨霄斐,苏鑫.国家级大数据综合试验区促进数字化绿色化协同发展研究[J].重庆大学学报(社会科学版),2025,(1):79~99.

[12]肖沁霖,邓宗兵,乔怡丹.长三角城市群数字化与绿色化协同发展的时空演变及溢出效应[J].地理科学进展,2025,(6):1178~1193.

[13]Haken H., 1983, *Advanced Synergetics* [M], Berlin: Springer.

[14]Haken H., 2004, *An Introduction: Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry and Biology* [M], Synergetics: Introduction and Advanced Topics, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

[15]Nicolis G., Prigogine I., 1977, *Self-organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations* [M], New York: John Wiley & Sons, Inc.

[16]Prigogine I., 1975, *Dissipative Structures, Dynamics and Entropy* [J], International Journal of Quantum Chemistry, 9(S9), 443~456.

[17]Prigogine I., 1978, *Time, Structure, and Fluctuations* [J], Science, 201(4358), 777~785.

[18]Prigogine I., 1980, *From Being to Becoming: Time and Complexity in the Physical Sciences* [M], San Francisco: W. H. Freeman and Company.

[19]Prigogine I., Lefever R., Nicolis G., 1975, *Stability and Self-organization in Open Systems* [M], New York: John Wiley & Sons, Inc.

[20]Wu B., Ma W., Zhao Q., 2025, *Digital Economy and Urban Green Transformation* [J], International Review of Financial Analysis, 104, 104286.

Models and Pathways for the Synergistic Development of Digitalization and Green Transformation

QI Yudong CAI Qingqing LUO Tianshu
(Business School, Beijing Normal University)

Summary: Currently, human society is at the convergence point of two profound transformations—digitalization and green development. Digitalization is reshaping production functions through exponentially growing computing power, algorithms, and data to achieve the goals of “Digital China” and new quality productive forces. On the other hand, green development is driving comprehensive innovation in production and lifestyles through a dual control mechanism on carbon emissions volume and intensity to achieve the ecological civilization goal of “Beautiful China.” Digitalization serves as the engine of development, while green transition acts as its constraint. Whether these two forces can transcend the limitations of single-dimensional development to achieve synergistic gains rather than mutual obstruction is a pivotal issue shaping the trajectory of high-quality economic and social development. Guided by Xi Jinping Thought on Economics and Ecological Civilization, this study integrates the synergy theory and dissipative structure theory into an economic framework to systematically elucidate the theoretical logic, typical models, and implementation pathways for the coordinated advancement of digitalization and green development. The intrinsic logic of dual transformation synergy lies in treating both as mutually conditional coupled constraints. Through the “institutional-capital-spatial” regulatory mechanism, this triggers the system’s leap from “local synergy” to “holistic synergy,” forming a sustainable growth pathway. Regarding typical models, our study identifies three synergistic development patterns of digitalization and green development: a “technology-driven” model centered on the hierarchical amplification effect of “technology-data-scenario-system,” a “regulation-driven” model based on the transmission chain of “regulation-price-risk-reputation” and a “spatial network” model that relies on the triple resonance of “nodes-links-fields.” Practical pathways are deconstructed across three dimensions—technology, institutions, and space. Technologically, “bidirectional integration + innovative breakthroughs” constitute the core driving force of dual transformation synergy. Institutionally, “rule-building + mechanism innovation” fortifies its safeguarding system. Spatially, “gradient layout + cross-domain coordination” optimizes its spatial configuration. The contributions of this study are as follows: First, grounded in theoretical logic and practical applicability, this study

supplements the theoretical exposition of the dynamic hierarchical transition mechanism for the coordinated development of digitalization and green development, distills typical development models, and summarizes practical pathways. This bridges the logical gap between micro-level mechanisms and macro-level manifestations in existing research. It clearly explains how micro-level technological applications dynamically evolve into meso-level system coordination and macro-level ecological synergy, thereby establishing mutual reinforcement between theoretical logic and existing empirical findings to address the logical gap in prior research. Second, the study builds on existing empirical evidence to establish replicable paradigms with enhanced contextual adaptability. The three models proposed in this study integrate into a modular paradigm through three distinct pathways—a stepwise progression from “technology–data–scenario–system,” a transmission chain linking “regulation–price–risk–reputation,” and a triple resonance mechanism involving “nodes–links–fields.” Their validity is supported by existing empirical evidence while remaining adaptable to the resource endowments of diverse regions, thereby addressing the limitation of existing research where case experiences are difficult to generalize. Finally, this study innovatively translates theoretical findings into more actionable, progressive implementation strategies. While existing research offers numerous policy recommendations, most focus on single dimensions and lack systematic integration across micro, meso, and macro levels. Based on the constructed theoretical framework and refined typical models, this study designs an integrated pathway featuring “two-way integration of technological dimensions + innovation breakthroughs, rule construction at the institutional dimension + mechanism innovation and gradient spatial layout + cross-domain coordination.” This dual-track synergistic development pathway follows a progressive logic from “micro–technology, meso–institutional to macro–spatial” dimensions. It systematizes and hierarchizes fragmented policy recommendations from existing research, offering a comprehensive solution with both theoretical depth and policy relevance to advance digitalization and green development from “initial coordination” to “deep integration.”

Keywords: Digitalization; Green Development; Synergy Theory; Dissipative Structure Theory; Dual Transformation Synergy

JEL Classification: O33; Q55; L52

(责任编辑:陈星星)