引用格式：姚延婷，万进陶. 数智化对区域协调发展的影响研究——基于双重机器学习的因果推断[J]. 技术经济，2026，45(4)：15-26.
Yao Yanting，Wan Jintao. Research on the impact of digital intelligence on coordinated regional development：Causal inference based on double machine learning[J]. Journal of Technology Economics，2026，45(4)：15-26.

数智化对区域协调发展的影响研究
——基于双重机器学习的因果推断

姚延婷，万进陶
（西北政法大学管理学院，西安 710122）

摘 要：数智化作为引领新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力，是推动区域协调发展的重要抓手。基于2011—2023年中国279个城市的面板数据，运用双重机器学习模型实证检验数智化对区域协调发展的影响效应及内在机制。研究发现：数智化对区域协调发展具有显著的促进作用，且这一整体效应明显强于数字化和智能化的单独效应。机制检验显示，数智化通过增强区域创新能力与优化区域产业结构，间接推动了区域协调发展。调节效应显示，政府干预有助于缓解数字鸿沟，从而强化数智化对区域协调发展的积极效应。异质性检验发现，数智化的促进作用受到地理区位条件与社会经济发展水平的影响，在东部地区、西部地区及经济发展水平相对较低的区域更为显著。进一步分析发现，数智化不仅能够促进区域整体经济增长，也有助于缩小“中心-外围”城市间发展差距。研究揭示了数智化赋能区域协调发展的内在逻辑，为因地制宜推进数智化建设、优化政府调控方式、破解区域发展不平衡问题提供了经验证据与政策参考，对于实现区域经济高质量发展具有重要的理论价值与现实意义。

关键词：数智化；区域协调发展；区域创新能力；区域产业结构；政府干预；双重机器学习
中图分类号：F124 **文献标志码**：A **文章编号**：1002-980X(2026)04-0015-12
DOI：10.12404/j.issn.1002-980X.J25110712

一、引言

千钧将一羽，轻重在平衡。以习近平同志为核心的党中央始终将促进区域协调发展置于国家发展的战略高度，先后部署了京津冀协同发展、长江经济带发展、粤港澳大湾区建设、长三角一体化发展等一系列重大区域战略。党的二十届四中全会进一步提出，发挥区域协调发展战略、区域重大战略、主体功能区战略、新型城镇化战略叠加效应，优化重大生产力布局，发挥重点区域增长极作用，构建优势互补、高质量发展的区域经济布局和国土空间体系。在中央政策的有力推动下，中国区域发展整体格局持续优化，地区间联动不断增强，区域发展差距逐步缩小。然而，中国幅员辽阔、人口众多，资源禀赋差异较大，部分地区在要素流动、制度衔接和产业协同等方面仍存在结构性障碍，区域发展不平衡不充分问题尚未得到根本解决。因此，如何突破区域发展瓶颈、增强区域发展协同性、实现区域协调发展，已成为推动全体人民共同富裕、全面建设社会主义现代化国家的关键任务。与此同时，随着新一轮科技革命和产业变革的深入推进，数据要素价值日益凸显，数字技术与智能应用加速向经济社会各领域广泛渗透，数智化赋能成为破解区域发展难题的重要突破口。《数字中国建设2025年行动方案》明确强调了数智化在区域经济社会发展中的重要性，指出要以数据要素市场化配置改革为主线，加快培育全国一体化数据市场；加快推进城市全域数字化转型，着力提升数字政务智能化水平，一体化推进数字基础设施扩容提质，持续深挖人工智能等数字技术应用新场景，以数字化驱动生产生活和社会治理方式变革。“十五五”规划建议再次强调，要加快人工智能等数智技术创新，深化其在产业发展、文化建设、民生保障、社会治理的融合应用。在此背景下，深

收稿日期：2025-11-07
基金项目：国家社会科学基金“跨境电商推进我国数字贸易强国建设机制与路径研究”(22BJY014)
作者简介：姚延婷(1982—)，博士，西北政法大学管理学院副教授，研究方向：数字经济与区域经济；(通信作者)万进陶(2002—)，西北政法大学管理学院硕士研究生，研究方向：数字治理与区域经济。

入探讨数智化对区域协调发展的影响效应及其内在机制，不仅有助于丰富数智化与区域协调发展的理论体系，也为国家推动数字中国建设、实现更高水平的区域协调发展提供理论支撑与政策参考，具有重要的学术价值与现实意义。

二、文献综述

学术界关于数智化和区域协调发展的研究已较为丰富，与本文主题紧密相关的文献主要聚焦于以下三方面：

第一，数智化相关研究。现有研究普遍认为，数智化是数字化发展到人工智能更高阶段的产物，是数字化与智能化的融合升级与再配置[1]。相较于传统数字化与智能化，数智化更强调数据价值的挖掘与智能决策的实现，从而实现更高层次的价值创造[2]。围绕数智化的经济社会效应，已有学者从微观企业、中观产业及宏观经济等层面展开。郑琼洁和石有为[3]发现数智化显著提升了企业创新管理能力。周建平等[4]指出，数字技术与人工智能的广泛应用能够推动产业转型升级，提升产业体系整体竞争力。韩先锋和李佳佳[5]则强调，数智化依托跨界融合、群智开放等新优势，可以持续提升经济系统技术水平，形成创新驱动的经济增长新模式。然而，现有研究多聚焦于数智化对技术创新与产业升级的促进作用，却较少从空间维度探讨其如何影响区域要素流动和资源配置。

第二，区域协调发展相关研究。区域协调发展的核心目标在于实现区域间的共富与发展，既要缩小区域经济差距，又要发挥各区域比较优势，提升整体经济增长质量[6]。早期研究多关注地区间经济总量差距，当前则更加关注创新能力、生态环境与公共服务等多维度的协调[7]。关于影响因素，现有成果大体可归纳为经济因素、政策因素与社会因素三类[8-11]。其中，经济因素主要包括产业结构异质性、要素禀赋差异及市场一体化水平，直接影响区域经济关联与发展动能；政策因素体现为政府区域发展战略、产业扶持政策及财政转移支付，为区域资源共享与优势互补提供制度保障；社会因素则涵盖人力资本结构、公共服务均衡配置及基础设施互联互通，是区域长期协调发展的基础支撑。尽管上述研究已对区域协调发展的传统驱动因素展开了较为系统的讨论，但在数字经济背景下，数智技术作为新兴关键驱动力量，其作用路径与影响效应仍有待进一步探索。

第三，数智化与区域协调发展相关研究。随着数字经济与人工智能的深度融合，学界虽已开始关注数智化对区域协调发展的潜在影响，但整体研究仍处于起步阶段。现有文献大多仅从数字化或智能化的单一维度展开探讨。从数字化维度看，数字基础设施建设能够直接缓解区域间因信息不对称与要素流动受限所带来的发展失衡问题[12]，并通过提高资源配置效率、优化产业分工、延伸数字化公共服务等间接路径，为落后地区创造发展契机，从而缩小地区差距[13]。然而，有研究指出，数字化初期，基础设施覆盖不均与数字技能差异可能会扩大“数字鸿沟”，反而加剧区域失衡；随着数字化普及与深化，其协调效应逐步增强，呈现出非线性特征[14]。从智能化维度看，智能技术凭借其渗透性、协同性与空间辐射性，能够促进跨区域知识溢出、创新网络构建与产业联动，增强区域经济联系[15]。有研究进一步表明，智能化赋能存在门槛效应，只有当区域智能化水平跨越特定门槛后，其促进作用及空间溢出效应才会显著释放[16]。但同时也有学者警示，智能技术的扩散可能存在“偏向性”，导致高端要素向核心城市集聚，使边缘地区陷入低端锁定，这在一定程度上可能加剧区域发展不平衡[17]。综上所述，现有研究虽从不同侧面揭示了数字化与智能化对区域协调的影响机制，却普遍忽视了二者在“数智融合”层面可能产生的协同效应与乘数效应，这制约了对新形势下区域协调发展新路径的深入探索。因此，亟须在“数智融合”的整体框架下，系统探讨数智化对区域协调发展的综合影响及作用机制。

鉴于此，本文以2011—2023年中国30个省份（因数据缺失，未含西藏地区及港澳台地区）279个城市为研究对象，系统分析数智化对区域协调发展的影响。主要贡献如下：第一，构建数智化影响区域协调发展的整体分析框架，从系统性视角弥补以往割裂式地研究数字化或智能化单一维度影响的不足，揭示出“数智化 > 智能化 > 数字化”的赋能特征，深化对数智化内涵及其交互效应的理解。第二，兼论经济增长与平衡发展的双重目标，在揭示数智化对城市内部区域协调发展微观影响的基础上，进一步从更宏观的视角探讨其

对区域整体经济增长及“中心-外围”城市间发展差距的收敛作用，为理解数智化在促进效率与公平统一方面提供新证据。第三，深入探讨政府干预在缓解数字鸿沟中的调节作用；聚焦区域创新能力提升与产业结构升级的关键机制，系统解析数智化对推动区域协调发展的间接影响；结合地理区位与经济发展水平的异质性，揭示数智化赋能效应的差异化特征。

三、理论分析与研究假设

（一）数智化对区域协调发展的直接效应

习近平总书记指出，新形势下促进区域协调发展，总的思路是：按照客观经济规律调整完善区域政策体系，发挥各地区比较优势，促进各类要素合理流动和高效集聚，增强创新发展动力，加快构建高质量发展的动力系统。数智化作为以数据要素为引擎、智能算法为驱动的新型发展动能，能够有效赋能各区域挖掘、发挥、塑造自身禀赋优势，为加快实现区域协调发展提供重要支撑。

首先，数智化能够有效推动区域比较优势的识别与转化，促进区域经济差异化发展。新结构经济学理论认为，区域经济发展的关键在于遵循其要素禀赋结构所决定的比较优势，并以此为基础构建具有竞争力的产业体系[18]。数智化凭借其数据挖掘与深度学习能力，能够系统整合与识别区域资源信息，并将其转化为可决策、可落地的生产性知识，助力欠发达地区精准识别自身优势资源与发展路径，从而有效破解传统发展模式下的同质化竞争与低水平路径依赖，推动形成优势互补、错位协同的区域经济新格局。其次，数智化有助于打破地理与行政边界，促进要素的跨区域流动与高效配置。长期以来，中国区域间存在资源要素的结构性失衡问题[19]，人才、技术、资本等关键要素呈现向发达地区单向集聚的态势。欠发达地区虽具备差异化特色资源，却因要素对接与流转机制不健全，面临资源闲置与发展动力不足的双重困境。数智化依托其跨域连接、虚实融合与智能响应的运行机制，能够有效突破行政分割与市场壁垒，推动全国统一大市场建设，显著降低信息不对称带来的交易成本，促进要素自由流动与优化集聚，增强区域发展的协调性与包容性。最后，数智治理能够提升区域政策的精准性与协同性，强化区域协同治理能力。在政策制定过程中，数智化可依托海量、实时、动态的数据，精准识别各地区的发展需求与瓶颈问题，为差异化政策设计与动态调整提供依据，避免“一刀切”政策对区域发展的不当干预。与此同时，数智化治理平台能够打破信息孤岛，实现政策制定、执行与评估全流程的信息共享与协同互动[20]，提升区域协同治理效能，为区域协调发展提供坚实的制度保障与治理支撑。

基于此，本文提出假设：

数智化能够直接促进区域协调发展（H1）。

（二）数智化对区域协调发展的间接效应

数智化凭借其高创新性、广覆盖性与强协同性等典型特征，突破了地理空间对区域发展的刚性约束，深刻改变了社会经济发展方式与空间组织形态，为区域协调发展注入了全新动力。基于此，本文将从增强区域创新能力和优化区域产业结构两个维度，系统阐释数智化推动区域协调发展的内在作用机理。

第一，增强区域创新能力。区域创新能力的提升是实现区域高质量发展的关键动力，也是推动区域协调发展的重要路径[21]。数智化的广泛渗透与深度应用，为区域创新生态带来了深刻变革。一方面，数智化依托大数据分析与人工智能算法，能够精准匹配区域创新需求与资源供给，优化创新资源配置，显著提升区域创新网络的连通性与协同效率；另一方面，数智化驱动的创新模式变革，显著降低了创新活动的参与门槛与成本，激发了多元主体的创新积极性，并通过推动开放式协作与迭代式研发，加速了创新成果的转化与扩散，从而提升区域整体创新效能。根据内生增长理论，区域创新活动具有显著的正外部性特征，其催生的知识溢出与技术扩散效应[22]，能够有效激活欠发达地区的内生增长动力，增强其自主发展能力，从而逐步缩小区域发展差距。与此同时，区域创新成果的普惠性应用也有助于推动基础设施与公共服务的均衡化发展，缓解教育、医疗、文化等领域的区域不平衡问题，促使发展成果更公平、更广泛地惠及不同地区，最终形成区域协调发展新格局。

第二，优化区域产业结构。产业结构很大程度上由其资源和区位禀赋决定[23]。这种先天条件固化了区

域产业发展的路径依赖,导致欠发达地区长期被锁定在低端环节,发达地区则持续占据高附加值领域,难以形成优势互补的区域产业协调发展格局[24]。数智化发展极大地削弱了本地资源和物理距离对产业结构形成的约束力,为各地区重构发展禀赋提供了重要契机。具体而言,数智化能够通过推动数据要素的渗透与融合,深度赋能欠发达地区传统产业生产、管理与营销全流程,助力其实现多场景、全链条的数字化转型。同时,产业数字化与数字产业化的双向赋能催生了大量新业态与新模式,进一步助推新兴产业与未来产业在欠发达地区孕育成长。此外,数智化还促进了产业链各环节加速解构与模块化,推动技术、人才、资本等高端要素跨区域流动与重组,使欠发达地区得以凭借自身特色资源,有效对接模块化产业链任务,逐步嵌入价值链中高端环节。这一进程不仅打破了传统区域分工中的"低端锁定"困境,还推动了区域产业结构向高级化与合理化演进,从而为促进区域协调发展注入持续动力。

基于此,本文提出假设:

数智化能够通过增强区域创新能力间接促进区域协调发展(H2);

数智化能够通过优化区域产业结构间接促进区域协调发展(H3)。

(三)政府干预的调节效应

随着数智技术在社会各领域的深度渗透,其在推动经济发展、优化公共服务、丰富生活场景的同时,也逐渐暴露出不同地区群体间在数字领域发展不均衡问题,形成了日益显著的"数字鸿沟"。该鸿沟既体现为不同地区在数字基础设施覆盖、设备拥有和网络服务可及性方面的"接入鸿沟",也反映为不同群体在数字素养、技能掌握与技术应用能力上的"应用鸿沟"。这种多层次、结构性的数字能力分化不仅会阻碍社会整体数智化转型,还可能加剧区域与群体间的不平等,引发社会经济发展新的不平衡。而政府干预作为影响数智化包容性进程的关键外部因素,能够借助多种政策工具和手段有效弥合数字鸿沟,助力区域协调发展。

一方面,政府可通过财政政策加大对欠发达地区数字基础设施的投入,推动5G网络、算力中心等新型信息基础设施延伸覆盖,提高终端设备普及率和网络服务可及性,从而补齐基础性与先导性数字资源供给短板,夯实数智化发展的物质基础,逐步缩小区域间"接入鸿沟";另一方面,政府可运用产业政策、税收优惠等间接手段,引导数字产业链配套环节、技术研发资源及数据要素向欠发达地区有序流动,缓解资源过度向核心地区集聚所产生的"虹吸效应",促进跨区域数字产业协同与共建共享,为持续缩小区域数字能力差距注入内生动力。另外,政府的积极干预行为也向社会传递出重视数智化包容发展的明确信号[5],有助于增强公众数字素养提升意识,逐步形成政府引导、企业主导与公众参与的多元协同治理格局,从而系统性地破解从"接入"到"应用"全链条上的区域数字鸿沟难题。

基于此,本文提出假设:

政府干预在数智化促进区域协调发展的过程中起到正向调节作用(H4)。

四、模型设定、变量选取与数据说明

(一)模型设定

本文借鉴张涛等[25]的研究方法,采用部分线性回归的双重机器学习模型检验数智化对区域协调发展影响效应,构建如式(1)所示的模型。

$$RCD_{it} = DIGI_{it}\theta_0 + g_0(T_{it}) + U_{it},\ E(U_{it} \mid DIGI_{it}, T_{it}) = 0 \tag{1}$$

其中:核心研究对象是系数 θ_0;下标 i 和 t 分别为个体与时间维度;被解释变量 RCD_{it} 为区域协调发展水平;解释变量 $DIGI_{it}$ 为数智化水平;T_{it} 为高维控制变量集合;$g_0(T_{it})$ 为被解释变量对控制变量集的回归函数;U_{it} 为条件期望为零的扰动项。

根据式(1),得到 θ_0 的处置效应系数为

$$\hat{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T} DIGI_{it}^2\right)^{-1} \frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T} DIGI_{it}[RCD_{it} - \hat{g}_0(T_{it})] \tag{2}$$

其中:n 为样本总量;$\hat{g}_0(T_{it})$ 为 $g_0(T_{it})$ 的似然函数值。

为使系数估计量在小样本下满足无偏性,构建辅助模型如式(3)所示。

$$DIGI_{it} = m_0(T_{it}) + v_{it},\ E(v_{it} \mid T_{it}) = 0 \tag{3}$$

其中：$m_0(T_{it})$ 为解释变量对控制变量集的回归函数；v_{it} 为条件期望为零的扰动项。

此时将 $\hat{V}_{it}$ 看作 $DIGI_{it}$ 的工具变量进行回归，得到新的无偏估计量如式(4)所示。

$$\tilde{\theta}_0 = \left(\frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T}\hat{V}_{it}DIGI_{it}\right)^{-1}\frac{1}{n}\sum_{i\in I,t\in T}\hat{V}_{it}[RCD_{it} - \hat{g}_0(T_{it})] \tag{4}$$

(二)变量设置

1. 被解释变量

区域协调发展(*RCD*)。夜间灯光数据作为人类活动与经济发展水平的客观表征，能够有效反映区域发展的时空动态与结构特征。本文参考既有方法[6,12]，整合 1992—2013 年 DMSP(defense meteorological satellite program)与 2012—2023 年 VIIRS(visible infrared imaging radiometer suite)两期夜间灯光数据，构建 2011—2023 年连续栅格数据集，并以城市内部栅格单元灯光强度的变异系数(标准差与均值之比)作为衡量城市内部发展差异的指标，从而更精准地反映空间区域分异特征，为区域协调发展研究提供科学支撑。

2. 解释变量

数智化(*DIGI*)。数智化是数字化与智能化深度融合、相互促进的系统性进程，其核心价值在于二者协同所产生的倍增效应。为科学评估各地区在这一复合维度上的发展水平，本文借鉴张云和柏培文[1]的研究思路，兼顾数据可得性与评价系统性，选取地区数字化水平与智能化程度作为核心评价维度，构建数智化发展水平综合评价体系，并采用熵值法对各项指标进行客观赋权。具体指标及其说明见表 1。

表 1　数智化评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	四级指标
数智化	数字化	数字基础设施	长途光缆线密度
			人均互联网宽带接入端口
		数字用户	每百人移动电话用户数
			每百人互联网用户数
			人均电信业务总量
	智能化	人工智能	ln(人工智能产业企业数+1)
		5G	ln(5G 产业企业数+1)
		区块链	ln(区块链产业企业数+1)

3. 机制变量

本文从增强区域创新能力和优化区域产业结构两个维度，探讨数智化对区域协调发展的影响机制。具体衡量路径如下：①区域创新能力(*RII*)，采用发明专利授权量加 1 后取对数值作为代理指标，以反映地区知识创造与技术转化水平；②区域产业结构(*OIS*)，采用产业结构高级化指数衡量($OIS = \sum_{m=1}^{3} y_{imt} \times m,\ m = 1, 2, 3$，$y_{imt}$ 为 i 城市在 t 年内第 m 产业增加值与地区生产总值的比值)。

4. 调节变量

政府干预(*GOV*)。政府可通过财政补贴、产业政策引导、基础设施投入等途径影响区域经济格局与资源配置效率。因此，本文采用财政一般预算支出占地区生产总值的比值作为政府干预的代理指标，该比值越高，表明地方政府对区域经济运行与资源配置的参与程度越深，资源配置的导向性越强，其对地区发展的调控作用也更为显著。

5. 控制变量

考虑到经济发展中诸多因素会对研究结果产生影响，为全面控制可能影响研究结论的关键外部因素，确保研究结果的准确性与可靠性，选择以下变量作为控制变量：①对外开放程度(*OP*)，货物进出口总额(按人民币计价)/地区生产总值；②城镇化水平(*UR*)，城镇人口/总人口；③金融发展水平(*FD*)，年末金融机构存贷款余额/地区生产总值；④人力资本水平(*HC*)，普通高等学校在校学生数/年末总人口；⑤人口规模(*PS*)，户籍人口的对数值；⑥教育支出水平(*ED*)，教育支出/政府财政一般支出。

(三)数据说明

数据选取2011—2023年中国30个省份(因数据缺失,未含西藏及港澳台地区)的279个地级及以上城市作为研究对象,构建了平衡面板数据集。数据来源方面,区域协调发展数据基于美国国家海洋与大气管理局(NOAA)提供的全球夜间灯光栅格数据提取;智能化相关指标原始数据来自企研·社科大数据平台;其余变量数据来源于《中国统计年鉴》《中国科技统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国市级政府财政透明度研究报告》及各城市政府工作报告等官方或公开资料。在数据处理过程中,对部分缺失值采用线性插值法予以填补,并对数量级较大的变量进行对数化处理或单位放缩,以增强数据的平稳性与模型估计效果。表2为主要变量的描述性统计结果。

表2 基本变量描述性统计分析

变量类型	变量名称	变量符号	平均值	标准差	最小值	最大值
被解释变量	区域协调发展	*RCD*	0.242	0.165	0.003	1.487
解释变量	数智化	*DIGI*	0.076	0.048	0.007	0.654
中介变量	区域创新能力	*RII*	5.243	1.842	0	11.589
	区域产业结构	*OIS*	2.316	0.143	1.831	2.846
调节变量	政府干预	*GOV*	0.202	0.101	0.044	0.916
控制变量	对外开放程度	*OP*	0.024	0.027	0.001	0.294
	城镇化水平	*UR*	0.400	0.210	0.075	0.990
	金融发展水平	*FD*	2.635	1.200	0.588	8.777
	人力资本水平	*HC*	0.021	0.026	0.004	0.185
	人口规模	*PS*	5.901	0.689	2.970	8.136
	教育支出水平	*ED*	0.175	0.039	0.015	0.356

五、实证结果与分析

(一)基准回归结果

本文利用双重机器学习模型对数智化促进区域协调发展的影响效应进行实证检验。在模型设定上,利用K折交叉验证法设置5折划分比例,将样本以1:4比例分割,通过随机森林算法进行回归分析。

根据表3的(1)列的回归分析结果,在引入控制变量一次项且控制时间及城市固定效应的条件下,数智化的估计系数为-0.392,且在1%水平上显著为负,表明数智化对区域协调发展具有显著的促进作用。在(1)列基准模型的基础上,(2)列通过引入二次控制变量对双重机器学习模型进行优化,结果显示数智化的系数为-0.386,依然在1%水平上显著,这一结果进一步强化了研究结论的可靠性,即研究假设H1得以成立。

表3 数智化对区域协调发展的基准回归结果

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	区域协调发展	区域协调发展	区域协调发展	区域协调发展
数智化	-0.392*** (0.098)	-0.386*** (0.096)		
数字化			-0.139*** (0.049)	
智能化				-0.191*** (0.025)
控制变量一次项	控制	控制	控制	控制
控制变量二次项	不控制	控制	控制	控制
时间固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
观测值	3627	3627	3627	3627

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平;括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

为明晰数字化与智能化在赋能区域协调发展中的差异化作用，表3的(3)列和(4)列分别展示了两者的估计结果。数字化与智能化的回归系数分别为-0.139和-0.191，均在1%水平上显著。由此可见，数智化对区域协调发展的促进效应最强，智能化次之，数字化最小。数字化与智能化的协同效应显著大于单一要素，呈现出“1+1>2”的特征。其原因可能是：数智化并非数字化与智能化的简单叠加，而是通过二者深度融合衍生出更为多维的要素整合能力与系统协同效能。数字化为智能化提供了数据基础与底层架构，而智能化则进一步提升了数据处理与决策优化的效率与精度，两者相互赋能、彼此增强，突破单一技术路径的边界约束，在更大范围与更深层次上推动区域资源配置优化与发展质量提升，从而加速区域间差距的缩小与整体发展水平的提升。

(二)稳健性检验与内生性处理

1. 稳健性检验

本文综合运用多种方法对基准回归结论可靠性加以验证。一是剔除异常值。鉴于部分变量可能存在极端值，对所有原始变量在1%分位点实施了双侧缩尾处理。经样本调整后重新进行基准回归分析，从表4的(1)列可以看出，数智化的系数为-0.677，在1%水平上显著，支持了基准结论的稳健性。二是剔除直辖市样本。为增强研究结论的普适性，本文进一步剔除了行政地位特殊的直辖市样本进行检验。表4的(2)列回归结果显示，排除4个直辖市后，数智化对区域协调发展的系数为-0.357，在1%水平上显著为负，进一步证实了研究结论的稳健性。三是样本分割比例调整。在5折交叉验证框架下，分别采用1:2和1:6两种样本分割比例进行稳健性检验。从表4的(3)列和(4)列可以看出，在不同分割比例下，数智化对区域协调发展的系数分别为-0.444和-0.326，均通过1%水平的显著性检验，表明研究结论不受样本划分方式的影响。

表4　稳健性检验

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)
	缩尾1%	剔除直辖市	1:2	1:6
数智化	-0.677***	-0.357***	-0.444***	-0.326***
	(0.091)	(0.088)	(0.104)	(0.084)
控制变量一次项	控制	控制	控制	控制
控制变量二次项	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是
观测值	3627	3575	3627	3627

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

2. 内生性检验

为缓解数智化与区域协调发展之间的逆向因果问题，本文采用工具变量法进行内生性处理。选取1984年每百人邮局数与时间虚拟变量的交互项作为数智化的工具变量。邮政基础设施是信息传递的早期载体，能够为地区数智化发展提供历史基础条件，满足其相关性要求。同时，1984年的邮政设施存量距今已远，与当前区域协调发展过程中的随机干扰因素无关，因而满足外生性假定。为进一步增强估计的稳健性，还引入核心解释变量数智化的滞后一期作为工具变量进行内生性检验。根据区域发展的路径依赖理论，当期数智化水平会受到前期建设基础的影响，而数智化的滞后一阶与当期区域协调发展过程中的随机干扰项不存在直接关联，因此核心解释变量数智化的滞后一阶满足相关性假定。从表5可以看出，两种工具变量下的数智化对区域协调发展均在1%水平上显著为负，表明在控制内生性问题后，数智化仍对区域协调发展具有显著促进作用，结果稳健。

表5　内生性检验

变量名称	(1)	(2)
	历史邮局	滞后项
数智化	-0.296***	-1.547***
	(0.105)	(0.351)
控制变量一次项	控制	控制
控制变量二次项	控制	控制
时间固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
观测值	3627	3348

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

（三）机制检验

本文通过二步法中介效应模型，系统检验了数智化建设对区域协调发展的作用机制，重点从增强区域创新能力与优化区域产业结构这两条关键路径展开深入分析。表6的（1）列显示，数智化建设对区域创新能力的影响系数为0.854，且在1%水平上显著为正，这表明数智化通过提供先进技术工具、促进知识溢出和加速创新要素流动，显著提升了区域整体创新水平，从而为区域协调发展注入了持续动力，假设H2得到有力支持。表6的（2）列表明，数智化建设对区域产业结构优化的影响系数为0.582，在1%水平上显著，体现了数智化通过改造传统产业和催生新兴数字产业，有效推动了产业结构向高级化、合理化方向演进，进而促进区域协调发展，假设H3亦获得充分验证。

表6　机制检验

变量名称	（1） 区域创新能力	（2） 区域产业结构	（3） 区域协调发展
数智化	0.854*** （0.191）	0.582*** （0.132）	−0.386*** （0.096）
控制变量一次项	控制	控制	控制
控制变量二次项	控制	控制	控制
时间固定效应	是	是	是
城市固定效应	是	是	是
观测值	3627	3627	3627

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

（四）调节效应检验

区域协调发展是推动中国经济社会持续健康发展的内在要求，也是实现共同富裕和现代化强国目标的重要路径。当前，中国区域发展仍面临不平衡、不充分等问题，亟须通过政策引导来促进各类要素合理流动和高效集聚，形成优势互补、高质量发展的区域经济布局。基于此，本文进一步考察政府干预在数智化推动区域协调发展过程中是否发挥调节作用。从表7可以看出，政府干预与数智化的交乘项系数为−3.485，在1%水平上显著，表明政府干预会显著强化数智化对区域协调发展的促进作用，研究假设H4成立。

表7　调节效应检验

变量名称	区域协调发展
数智化	−0.292*** （0.086）
政府干预	0.661*** （0.080）
政府干预×数智化	−3.485*** （0.907）
控制变量一次项	控制
控制变量二次项	控制
时间固定效应	是
城市固定效应	是
观测值	3627

注：***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

（五）异质性检验

1. 基于地理区域划分的异质性分析

为探究不同区域数智化对区域协调发展的差异化影响，本文将样本按地理位置划分为东部、中部、西部、东北地区四组进行回归分析，实证结果见表8。从回归系数来看，东部地区数智化的系数为−0.275，在1%水平上显著；中部地区系数为0.034，未通过显著性检验；西部地区系数为−0.226，在5%水平上显著；东北地区系数为−0.114，未通过显著性检验。从回归结果来看，数智化显著推动了东部和西部地区的协调发展，但对东北和中部地区的影响则不明显。其原因可能是：从政策层面来看，东部地区得益于国家数字经济创新发展试验区的政策红利，在数智技术应用与制度创新方面走在前列，率先构建起较为完善的区域数字生态系统。西部地区则受益于“东数西算”等国家战略布局，积极承接东部算力需求，加快数据中心集群建设与数字基础设施升级，为区域产业结构优化与协调发展注入新动能。从区域基础条件来看，东部地区具备完善的5G网络、工业互联网平台与高速算力节点，且高新技术产业集聚效应显著，能够充分发挥数智化的规模效应与溢出效应。西部地区凭借能源资源丰富、土地成本较低等优势，在数据中心建设与数字产业转移中形成后发潜力，逐步构建起支撑区域协调发展的数字产业体系。而中部地区虽然有一定的产业基础和人才储备，但在数智化基础设施建设、数字技术研发投入等方面相对滞后，限制了数智化对区域协调发展的推动作用。东北地区则由于历史遗留问题较多，如传统产业占比高、体制机制不够灵活等，导致数智化在该地区的应用和推广面临诸多困难，其对区域协调发展的促进效果相对较弱。

2. 基于经济发展水平的异质性分析

地区经济发展水平反映了一个地区的产业结构、要素禀赋及创新投入与产出能力等多方面特征，是影

响数智化对区域协调发展作用效果的重要因素。本文将样本按经济发展水平的中位数划分为高经济发展水平地区与低经济发展水平地区进行回归分析。从表 8 的(5)列和(6)列可以看出，低经济发展水平地区数智化对区域协调发展的回归系数为-0.629，高经济发展水平地区系数为-0.251，均在 1%水平显著，且系数绝对值大小呈现出低经济发展水平地区高于高经济发展水平地区的态势。其原因可能是：从发展阶段与后发优势看，低经济发展水平地区在数智技术应用初期具有较强的追赶效应，能够以较低成本吸收成熟技术，快速实现技术渗透与模式复制，在短期内显著改善资源配置效率，带动经济增长并促进区域协调发展；相比之下，高经济发展水平地区技术应用已相对饱和，现有体系成熟，技术更新面临较高转换成本，深化应用的边际收益递减，数智化的协调促进作用相对较弱。从要素配置与制度环境看，低经济发展水平地区通常面临资源错配与制度不完善的问题，数智化通过优化要素流动、提升治理效率，能够释放出更强的协调效应；而高经济发展水平地区市场机制相对健全、要素配置已较为高效，数智化的边际提升空间相对有限，对协调发展的促进作用趋弱。

表 8　异质性检验

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	东部地区	中部地区	西部地区	东北地区	低经济发展水平	高经济发展水平
数智化	-0.275***	0.034	-0.226**	-0.114	-0.629***	-0.251***
	(0.098)	(0.113)	(0.095)	(0.109)	(0.171)	(0.073)
控制变量一次项	控制	控制	控制	控制	控制	控制
控制变量二次项	控制	控制	控制	控制	控制	控制
时间固定效应	是	是	是	是	是	是
城市固定效应	是	是	是	是	是	是
观测值	1118	1027	1053	429	1814	1813

注：***、**、*分别表示 1%、5%、10%的统计显著性水平；括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

六、进一步分析

区域协调发展是区域内经济持续增长和区域间经济平衡发展的有机结合[26]。它不仅关注单一区域内部的发展质量与效率，更强调不同区域之间的协同互动与均衡推进。前文探讨了数智化对城市内部各区域协调发展的作用机制，接下来将进一步分析数智化对区域整体经济增长及城市间各区域协调发展的影响效应。

为系统揭示数智化在更大空间尺度的经济效应与协调作用，本文采用夜间灯光均值作为经济发展水平的代理变量[27]，并通过双重机器学习模型展开实证分析。从表 9 的(1)列可以看出，数智化的回归系数为 0.424，且在 1%水平上显著，表明数智化显著促进了区域经济增长。究其原因：一方面，数智化通过优化资源配置效率、提升全要素生产率，能够有效增强区域产业竞争力，发挥规模经济与范围经济的双重效应，进而推动区域经济增长；另一方面，借助数字平台与智能推荐系统，区域内的中小企业和个体生产者能够以较低成本触达多样化、碎片化的市场需求，将传统模式下难以覆盖的“长尾”市场转化为实际经济收益，从而为区域经济增长提供了新的增长点。此外，数智化技术还促进了区域间的协同效应，打破了地域限制，加强了区域之间的信息交流、资源共享和产业协作，使得各区域能够在优势互补的基础上实现协同发展，共同推动区域经济增长。

在考察数智化对城市间区域协调发展的影响时，本文参考现有研究[12]将直辖市与省会城市界定为区域中心城市，其余为非中心城市，并构建如式(8)所示的城市间发展差距指标(*BRD*)。

$$BRD_{i,t}=\frac{Light^{c}_{j,t}}{Light_{i,j,t}} \tag{5}$$

其中：i 为城市；j 为区域；t 为年份；$Light^{c}_{j,t}$ 为区域 j 的中心城市在年份 t 的平均夜间灯光亮度；$Light_{i,j,t}$ 为区域 j 内城市 i 在年份 t 的平均夜间灯光亮度；$BRD_{i,t}$ 为城市 i 在年份 t 与所属区域中心城市的年平均夜间灯光亮度之间的相对差距。

数智化对城市间区域协调发展的回归结果见表9的(2)列。数智化的系数为-2.308,且通过1%水平的显著性检验,表明数智化能充分发挥数字协同效应缩小“中心-外围”城市的发展差距,促进城市间区域协调发展。究其原因:首先,数智化显著增强了中心城市的扩散与辐射效应,通过构建跨区域数字网络和共享平台,促进知识溢出、技术转移和资本流动,使中心城市的发展动能更有效地向外围区域传导;其次,数智化有效提升了非中心城市的接收与承接能力,通过改善其信息基础设施和数字技能供给,帮助外围地区突破地理局限,更高效地对接中心区域的资源辐射与产业转移;最后,数智化强化了中心城市与非中心城市之间的双向协同效应,推动形成功能互补、分工协作的区域发展新格局,在动态平衡中实现整体区域经济效率与公平的统一。

表9　进一步分析检验结果

变量名称	(1)	(2)
	区域整体经济增长	区域协调发展
数智化	0.424***	-2.308***
	(0.113)	(0.849)
控制变量一次项	控制	控制
控制变量二次项	控制	控制
时间固定效应	是	是
城市固定效应	是	是
观测值	3627	3627

注:***、**、*分别表示1%、5%、10%的统计显著性水平;括号内为聚类到城市层面的稳健标准误。

七、结论与建议

本文基于城市-年份层面的数智化指数匹配数据,采用双重机器学习模型,实证考察了数智化对区域协调发展的影响。研究结果表明:数智化整体上显著推动了区域协调发展,其赋能效应呈现“数智化 > 智能化 >数字化”阶梯式特征。机制检验表明,数智化主要通过激发区域创新活力与推动区域产业结构优化两条路径推动区域协调发展。调节效应分析显示,政府干预有助于缓解“数字鸿沟”,从而强化数智化对区域协调发展的积极效应。异质性分析发现,数智化对区域协调发展的促进作用在东部地区、西部地区及低经济发展水平地区更为显著。进一步分析发现,数智化不仅能够促进区域整体经济增长,也有助于缩小“中心-外围”城市间的发展差距,这进一步验证了数智化在推动区域均衡发展方面的重要作用。

基于上述研究结论,本文提出如下政策建议:

第一,全面推进数智化建设,加快构建高效协同的数智支撑体系。首先,应统筹规划并加快布局5G网络、工业互联网、数据中心等新型基础设施,持续优化网络与算力资源配置,推动区域间数智基础设施共建共享与效能提升。其次,构建统一规范的数据资源治理体系,健全跨部门、跨层级的数据共享与业务协同机制,加强网络安全与数据隐私保护制度建设,为数智化发展提供制度保障。最后,注重数智化人才培养与区域流动,深化校企协同与产教融合,着力提升人才实践创新能力,并进一步完善人才流动的激励与保障机制,打破户籍、社保等制度性障碍,推动发达地区优质人才资源向欠发达地区辐射,为区域数智化均衡发展提供坚实人力资本支撑。

第二,深化区域间数智创新与产业协同,充分激发区域发展内生动力。一方面,构建跨区域数智创新协同体系,依托发达地区的技术优势与创新资源,建设区域性数智创新联盟与技术转移中心,推动创新成果向欠发达地区精准转化,同时支持欠发达地区围绕特色产业建设专业化创新平台,聚焦细分领域突破关键技术瓶颈,形成“发达地区引领创新、欠发达地区特色突破”的区域创新格局;另一方面,以数智化赋能产业结构梯度升级,引导发达地区依托数智技术推动高端制造业与现代服务业深度融合,向价值链高端攀升,同时支持欠发达地区利用数智化改造传统产业,培育壮大数字农业、智能制造等特色产业集群,通过产业转移与承接的精准对接,形成发达地区与欠发达地区优势互补、协同发展的产业体系。

第三,合理发挥政府干预的调节作用,弥合数字鸿沟,增强数智化发展的包容性与普惠性。一方面,聚焦欠发达地区,加大网络基础设施建设投入,借助财政补贴与政策扶持,加速宽带网络覆盖,提升网络质量,降低接入成本,有效缓解接入鸿沟;另一方面,针对数字弱势群体,开展数字技能培训,量身定制个性化方案,提升其数字素养与技能,增强其运用数智技术的能力与信心,缓解应用鸿沟。另外,推动公共服务数智化普惠升级,依托数智技术优化教育、医疗、社保等公共服务资源的配置效率,建设全国统一的公共服务数智平台,实现优质公共服务资源的跨区域共享,让数智化成果更多更公平惠及全体人民,逐步弥合因资源不

均造成的“数字鸿沟”，促进区域协调发展与公平普惠。

第四，坚持因地制宜、分类施策，针对不同地区实际情况实施精准化、差异化的支持政策。一方面，东部地区重点支持数智技术创新与前沿应用，打造全球数字经济创新高地，发挥其对全国区域协调发展的引领带动作用；西部地区重点加强数智基础设施建设，利用其资源与区位优势，建设大数据中心和算力枢纽，推动数智技术在特色产业中的应用；中部地区与东北地区重点补齐数智基础设施短板，通过对口支援、区域合作等方式承接东部地区的技术与产业转移，逐步缩小与东部地区的数智化发展差距。另一方面，对经济发达地区重点支持其开展更高水平的数智融合创新，增强对周围地区经济协调发展的辐射效应；对经济发展水平相对较低的区域，加大财政转移支付与政策扶持力度，优先保障数智基础设施建设与基本数字素养提升，通过“输血 + 造血”相结合的方式，帮助其夯实数智化发展基础。

参考文献

[1] 张云，柏培文. 数智化如何影响双循环参与度与收入差距——基于省级-行业层面数据[J]. 管理世界，2023，39(10)：58-83.

[2] 陆岷峰. 金融强国与金融新质生产力：构建以数智化驱动的金融高质量发展新生态[J]. 中国流通经济，2024，38(5)：18-27.

[3] 郑琼洁，石有为. 从技术嵌入到生态重构：数智赋能专精特新企业创新的机理与路径[J]. 现代经济探讨，2025(9)：94-107.

[4] 周建平，徐维祥，刘程军，等. 中国城市数智化转型对产业现代化的影响[J]. 经济地理，2024，44(7)：117-125.

[5] 韩先锋，李佳佳. 数智化赋能城市包容性绿色增长：来自双重机器学习的因果推断[J]. 中国人口·资源与环境，2025，35(6)：177-189.

[6] 方锦程，刘颖，高昊宇，等. 公共数据开放能否促进区域协调发展？——来自政府数据平台上线的准自然实验[J]. 管理世界，2023，39(9)：124-142.

[7] 孙久文，董红燕. 区域协调发展的新趋势、新模式与动力机制[J]. 改革，2025(5)：13-28.

[8] 蔡玉胜，董微微，潘汝南. 多重视角下数字经济对区域协调发展的影响及优化策略[J]. 经济纵横，2024(4)：47-53.

[9] 高杨，杨洋，吴振磊. 中国城乡融合和区域协调发展联动的时空分异与形成机理[J]. 财经问题研究，2025(1)：114-129.

[10] 张莹. 区域协调发展：战略演化、影响因素、绩效评价与政策设计[J]. 科技管理研究，2022，42(17)：38-46.

[11] 侯冠宇. 内涵式发展：完善实施区域协调发展战略机制的关键特征、价值意蕴与实践进路[J]. 技术经济，2025，44(4)：49-56.

[12] 吴志军，温星星，孔欣紫. 数字基础设施建设赋能区域协调发展的逻辑机理和经验证据[J]. 经济问题探索，2025(5)：77-90.

[13] 田瑶，郭立宏. 数字经济与地区共享发展——基于区域经济协调发展的视角[J]. 经济问题探索，2024(2)：1-16.

[14] 张瀚禹，吴振磊. 数字创新合作、应用鸿沟与区域间共同富裕[J]. 财经研究，2024，50(8)：49-63.

[15] FENG C，YE X，LI J，et al. How does artificial intelligence affect the transformation of China's green economic growth? An analysis from internal-structure perspective[J]. Journal of Environmental Management，2024，351：119923.

[16] 王士香，孙嘉笛，刘备. 工业智能化与城市经济增长：来自空间溢出与门槛效应的经验证据[J]. 东南大学学报(哲学社会科学版)，2023，25(6)：56-65，144.

[17] 朱家琦，任剑新. 数据要素与人工智能技术融合对区域经济发展差距的影响——基于30个省份的实证研究[J]. 科技进步与对策，2025，42(15)：1-10.

[18] 韩永辉，韦东明，张帆，等. 全球价值链距离如何影响企业跨国并购——基于新结构经济学框架的理论分析与中国经验[J]. 中国人民大学学报，2025，39(4)：93-107.

[19] 魏后凯. 促进区域协调发展的战略抉择与政策重构[J]. 技术经济，2023，42(1)：14-24.

[20] MORAVEC V，HYNEK N，SKARE M，et al. Human or machine? The perception of artificial intelligence in journalism，its socio-economic conditions，and technological developments toward the digital future[J]. Technological Forecasting and Social Change，2024，200：123162.

[21] 刘乃全，李一杰，王法政. 协同创新与区域发展差距：来自长三角地区的经验证据[J]. 经济与管理评论，2025，41(5)：16-29.

[22] 郭凯明，王钰冰，杭静. 数据要素规模效应、产业结构转型与生产率提升[J]. 中国工业经济，2024(8)：5-23.

[23] 史利江，刘敏，李艳萍，等. 汾河流域县域经济差异的时空格局演变及驱动因素[J]. 地理研究，2020，39(10)：2361-2378.

[24] 李美玲，张立杰，艾院祥. 统一大市场建设与国内大循环畅通——兼论国内国际市场的协同效应[J]. 消费经济，2025，41(2)：59-75.

[25] 张涛，李均超. 网络基础设施、包容性绿色增长与地区差距——基于双重机器学习的因果推断[J]. 数量经济技术经济研究，2023，40(4)：113-135.

[26] 马述忠，张道涵，胡增玺. 数字知识流动如何促进区域协调发展——兼论经济增长和平衡发展双重目标[J]. 中国工业经济，2025(2)：80-98.

[27] 郑林昌，刘焕景，耿傲森. 数字产业价值集聚对城市经济发展的影响：演化特征、指数测度与空间效应[J]. 现代财经(天津财经大学学报)，2025，45(10)：39-57.

Research on the Impact of Digital Intelligence on Coordinated Regional Development: Causal Inference Based on Double Machine Learning

Yao Yanting, Wan Jintao

(School of Management, Northwest University of Political Science and Law, Xi'an 710122, China)

Abstract: Digital intelligence, as a core driving force leading the new round of scientific and technological revolution and industrial transformation, is regarded as an important lever for promoting coordinated regional development. Based on panel data from 279 Chinese cities spanning the period from 2011 to 2023, the impact effects and underlying mechanisms of digital intelligence on coordinated regional development were empirically examined using a double machine learning model. It is found that digital intelligence significantly promotes coordinated regional development, and this overall effect is notably stronger than the individual effects of digitalization or intelligence alone. Mechanism tests reveal that digital intelligence indirectly facilitates coordinated regional development by enhancing regional innovation capacity and optimizing regional industrial structures. Moderating effect analysis indicates that government intervention contributes to mitigating the digital divide, thereby strengthening the positive effect of digital intelligence on coordinated regional development. Heterogeneity tests demonstrate that the promotional effect of digital intelligence is influenced by geographical conditions and socioeconomic development levels, and it is found to be more pronounced in the eastern region, the western region, and areas with relatively lower levels of economic development. Further analysis shows that digital intelligence not only promotes overall regional economic growth but also helps narrow the development gap between "core" and "peripheral" cities. The above study reveals the internal logic of empowering coordinated regional development through digital and intelligent transformation, providing empirical evidence and policy references for advancing such transformation in a context-specific manner, optimizing government regulation methods, and addressing regional development imbalances. It holds significant theoretical value and practical implications for achieving high-quality regional economic development.

Keywords: digital intelligence; coordinated regional development; regional innovation capacity; regional industrial structure; government intervention; double machine learning