

数字基础设施对城乡融合的影响及作用机制研究

冯春烨¹, 席广亮^{1,2*}, 牛月^{1,3}, 吾买尔艾力·艾买提卡力⁴

(1. 南京大学 建筑与城市规划学院, 江苏 南京 210093; 2. 城市AI与绿色人居环境营造省高校重点实验室, 江苏 南京 210093;
3. 青海师范大学 地理科学学院, 青海 西宁 810001; 4. 新疆师范大学 商学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 数字经济的快速发展正在全面重塑城乡关系, 数字基础设施作为其关键支撑, 对城乡融合发展具有重要影响, 探索数字基础设施对城乡融合的影响及其效应, 对于促进城乡关系协调和可持续发展具有重要价值。因此, 文章以中国297个城市为案例, 利用2012—2022年的时间序列数据, 运用双向固定效应模型探索数字基础设施建设对城乡融合发展的影响效应, 并分析健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)、气候行动(SDG13)等可持续发展目标的中介作用。研究结果显示, 数字基础设施对城乡融合进程产生了积极且显著的影响; 健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)与气候行动(SDG13)等可持续发展目标在数字基础设施促进城乡融合发展的过程中均起到促进作用, 同时数字基础设施对城乡融合发展的推动作用存在区域差异。

关键词: 数字基础设施; 城乡融合; 可持续发展; 调节作用; 空间异质性

中图分类号: K901

文献标识码: A

文章编号: 1008-9659(2026)04-0001-11

协调城乡关系是推动新型城镇化和乡村振兴的重要途径, 城乡融合发展有助于缩小城乡发展差距、优化城乡要素布局、提升城乡居民互融互动水平。城乡关系作为最基本的经济社会关系^[1], 城乡融合发展成为实现可持续发展的重要途径。各类要素流动塑造区域、城市及社区等不同尺度的空间组织^[2]。因此, 城乡要素的合理流动是重构城乡关系, 推动城乡融合发展的关键^[3-5]。改革开放特别是党的十八大以来, 我国相继出台《中共中央 国务院关于建立健全城乡融合发展体制机制和政策体系的意见》《2022年新型城镇化和城乡融合发展重点任务》等政策文件, 标志着城乡融合发展已成为国家发展战略的重要组成部分。人口、空间和产业是城乡融合系统中的核心要素, 如何促进城乡多要素的合理流动与科学布局, 是推动城乡融合与高质量发展的关键。

21世纪初, 全球范围的数字化浪潮迅速兴起, 信息和通信技术(ICTs)的飞速发展推动了全球经济、产业和社会治理的深度变革。在这一背景下, 中国积极响应, 先后印发《2006—2020年国家信息化发展战略》《“十四五”数字经济发展规划》等文件, 全面推动数字经济和数字化转型发展。数字基础设施建设是推动数字化发展的重要基础, 新一代信息通信技术以及各类数字平台的快速崛起, 使数字基础设施建设趋于完善。数字基础设施支撑下的要素流改变了各类要素流动的结构和范式^[6], 为实现城乡融合发展提供了新动力。同时, 数字基础设施的全面发展也促进了企业绿色生态转型^[7]、城市空气污染降低^[8]、绿色发展^[9]以及区域碳减排^[10]、碳中和效应^[11], 为实现可持续发展提供了强有力的保障。已有较多研究关注城乡融合的影响因素、数字化与城乡融合的耦合关系, 但数字基础设施对城乡融合的影响效应有待进一步探索。基于此, 本研究利用多源数据, 以全国297个城市为案例, 从经济层面构建涵盖人、空间、产业等要素的城乡融合指标体系, 探究数字基础设施建设对城乡融合的促进作用, 并从社会、经济、环境维度挖掘健康福祉、优质教育以及气候行动等可持续发展目标的中介作用。研究对于促进城乡融合、优化数字基础设施建设及实现可持续发展

[收稿日期] 2025-12-01

[修回日期] 2026-01-04

[基金项目] 国家自然科学基金项目(42471245; 42330510)。

[作者简介] 冯春烨(2001-), 女, 硕士研究生, 主要从事数字经济与城乡融合方面研究, E-mail: 522023360087@smail.nju.edu.cn.

* [通讯作者] 席广亮(1985-), 男, 副教授, 主要从事数字化转型与城市空间重构、都市圈发展与空间规划方面研究, E-mail: xiguangliang@nju.edu.cn.

目标具有重要价值。

1 文献综述

缩小城乡差距,促进城乡融合是可持续发展的重要目标,也是世界各国需要应对的全球性挑战。国际上,城乡融合研究主要关注乡村治理^[12]、乡村企业^[13-14]等个体层面的优化如何推动乡村发展,缩小城乡差距并促进城乡融合,也有研究聚焦于城乡区域划分^[15-16],探讨城乡地域演变。这些研究较少关注城乡之间的要素流动与融合发展。当前,我国关于城乡融合的研究,主要从理论探索与实证分析两方面展开。理论探索方面,主要进行城乡关系演变^[17]以及城乡融合的概念界定^[18]、机理分析^[18]与发展路径^[19]探讨。实证分析方面,主要围绕城乡融合水平测度与评价、城乡融合的影响因素等展开。在城乡融合水平测度方面,已有研究主要基于人地关系系统协调^[20]、要素流动^[21-23]和土地功能利用^[24]等视角来解释城乡融合并构建相应的指标体系,例如“人-地-业”^[20]多维度、“经济、社会、人口、空间和生态”^[21]多要素以及“生产、生活、生态”^[25]多功能土地利用方式等。在构建指标体系的基础上,分析不同区域的城乡融合发展特征。在城乡融合的影响机制方面,主要探讨经济发展水平^[26]、对外开放度^[27]、交通可达性^[28]等因素的影响。例如,经济发展水平促进地区公共服务基础设施建设日趋完善,贸易与外资开放度促进城乡居民收入的提升,交通可达性会促进城乡间互联互通。这些都是实现城乡融合的重要基础和支撑。

以5G、数据中心、物联网为代表的数字基础设施逐渐成为区域经济发展的新动能^[29],数字要素与社会、经济等要素结合,对不同维度的城乡融合发展产生作用,并促进城乡可持续发展目标的实现。数字基础设施建设通过强化城乡要素联系,实现城乡经济、社会、环境等方面的融合发展。经济层面,数字化与产业相结合,催生出新的产业业态,同时缩小城乡收入差距。具体而言,互联网推动淘宝村、电商经济等农村新业态的发展^[30],其中,电子商务作为互联网的深度应用,能够破除农产品市场信息壁垒,提高农产品价格,直接提升农业从业者的收入^[31]。同时,依托互联网产生的线上交流平台通过提供新的渠道和创造灵活的工作环境来促进个体创业以及区域服务业就业增长^[32],从而提高城乡居民收入^[33]。数字基础设施为农村地区注入新经济增长动力的同时,推动了农业数字化升级以及乡村三产融合发展^[34-35]。社会层面,5G、互联网等数字基础设施广泛布局,城乡之间接入互联网硬件的差异不断缩小,基于互联网的远程教育、远程医疗缩小了城乡服务差距,在促进教育公平的同时提升了乡村居民综合素质;教育、医疗、就业等行业信息在线上交流平台不断交换,无论身份还是地区差异,互联网接入者均可接收信息,一定程度上促进了社会的公平包容发展^[36]。从环境层面上,数字基础设施的持续完善使以往的线下交流办公模式逐渐转向网络线上空间的互动^[37]。淘宝村、网红村等乡村新型经济主体的出现,使得部分乡村成为新的经济活动聚集地。在数字基础设施的支撑下,经济活动主体的分布由传统的城市集中、企业规模经营逐渐转向部分经营主体向乡村地区延伸、企业布局更加零散灵活的多元化模式^[30]。同时,基础设施数字化所涉及的技术通过优化生产流程、降低农业生产的碳强度^[38],推动产业低碳发展以及提高经济韧性^[39],降低城市的空气污染程度^[8],促进城乡绿色发展。可见,在数字基础设施推动城乡融合的过程中,体面工作(SDG8)、优质教育(SDG4)、健康福祉(SDG3)与气候行动(SDG13)等可持续发展目标也在实现。数字基础设施影响城乡融合的机制方面,有学者认为数字基础设施可以通过加速劳动、资本、土地、数据等要素配置效率^[40]、促进农村金融发展和财政分权^[31]、提高技术创新水平和增加乡村人力资本^[41]等来促进城乡融合发展。但可持续发展目标在数字基础设施促进城乡融合中的作用鲜有研究。

综上所述,已有研究大多关注数字经济对城乡融合的影响,而对数字基础设施作为数字经济的关键载体,对城乡融合是否具有影响作用,关注较少。此外,数字基础设施在推动城乡融合的过程中,对社会、经济、环境等维度可持续发展目标具有积极的促进作用。这些维度的可持续发展目标与城乡融合发展具有较高的契合度,部分可持续发展目标的实现能有效促进城乡融合。但在现有研究中,探讨数字基础设施如何通过实现可持续发展目标进而推动城乡融合的研究也较少。因此,探讨数字基础设施能否通过促进可持续发展

目标的实现来推动城乡融合,值得进一步挖掘和探索。基于此,本研究从宏观视角出发,探讨2012—2022年中国数字基础设施对城乡融合的影响,从“人-空间-产业”维度构建指标体系。运用双向面板固定效应模型探讨数字基础设施对城乡融合的影响,运用中介效应模型检验城乡污染水平、教育水平、碳排放强度等在该过程中的作用,亦反映实现健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)与气候行动(SDG13)等可持续发展目标所产生的间接影响。同时,分析不同区域及不同城市规模的异质性,研究数字基础设施在不同的地理位置对城乡融合的影响作用。

2 数据来源、模型介绍及变量说明

2.1 研究对象与数据来源

本研究选择中国地级及以上城市(以下简称“城市”)作为研究对象,剔除部分数据缺失的城市,确定297个城市作为样本地。数据主要来源于2012—2022年的《中国城市统计年鉴》以及各省(区、市)统计年鉴数据。夜间灯光数据为500 m分辨率类NPP-VIIRS夜间灯光数据;专利数据来源于国家知识产权局,采用专利分类号A01检索得出农业专利数量;根据专利的主分类号与《数字经济及其核心产业统计分类(2021)》对比^[42],筛选得出数字经济专利数量;手机基站数据从OpenCellID数据库中筛选获取^[43]。

2.2 模型介绍及变量定义

本研究采用双向固定效应模型分析数字基础设施对城乡融合的影响。其主要用于控制不可观测的个体和时间异质性,从而更准确地评估变量之间的因果关系。同时考虑个体效应和时间效应,该模型能够有效消除这些因素对估计结果的影响。因此参考刘修岩等人^[37]的研究,构建双向面板固定效应模型

$$\ln U_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 \ln D_{it} + \alpha_2 X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

式中, i 代表城市; t 表示年份; U_{it} 表示核心被解释变量,即城乡融合发展水平; D_{it} 表示核心解释变量,即数字基础设施建设水平; X_{it} 表示随时间和个体变化的控制变量; μ_i 表示城市层面不随时间变化的特征; σ_t 表示时间固定效应; ε_{it} 为随机扰动项。为减少异方差,对部分指标采取对数处理。模型包括年份、城市固定效应,并聚类到城市层面。

为考察数字基础设施影响城乡融合发展的过程中其他变量所起的作用,采用中介效应模型进行分析。参考熊云彪等人^[31]的研究方法,设定具体的中介效应模型如下

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 \ln D_{it} + \beta_2 X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$\ln U_{it} = \lambda_0 + \lambda_1 \ln D_{it} + \lambda_2 M_{it} + \lambda_3 X_{it} + \mu_i + \sigma_t + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

式(2)与式(3)中, M_{it} 表示中介变量,即可持续发展目标,其余变量与式(1)基本相同,式(2)、式(3)与式(1)共同构成了研究的中介效应模型。

2.2.1 被解释变量:城乡融合发展水平

参考Niu等人^[44]、Pan等人^[45]的相关研究,坚持科学性、客观性等原则,从人、空间、产业三个维度构建城乡融合发展水平指标体系(表1),并采用熵值法对中国297个城市2012—2022年的城乡融合发展水平进行测度。

2.2.2 解释变量:数字基础设施水平

数字基础设施是指支撑数字化社会发展的各项技术设施和服务,是推动城市数字化转型的关键底座。参考刘修岩等人^[37]的相关研究,采用每百人互联网宽带接入用户数、每百人移动电话用户数、人均电信业务总量、手机基站数量来测度数字基础设施建设水平。其中,每百人互联网宽带接入用户数用于反映互联网基础设施建设水平;每百人移动电话用户数用于反映移动通信基础设施覆盖程度;人均电信业务总量用于反映数字化应用程度;手机基站数量用于表征各城市的数字基础设施建设情况。采用熵值法对数字基础设施发展水平进行测度,具体指标体系及其权重如表1所示。

表1 变量指标体系及权重

一级指标	二级指标	测度方法	指标属性	权重
城乡融合	经济活动平衡	夜灯指数平均值	正向	0.1692
	产业结构高级化	(第二产业增加值+第三产业增加值)/第一产业增加值	正向	0.5408
	农业技术水平	农业专利数量	正向	0.2740
	城乡居民生活平衡	城乡居民人均可支配收入	负向	0.0160
数字基础设施	互联网普及率	每百人互联网宽带接入用户数	正向	0.1270
	移动电话普及率	每百人移动电话用户数	正向	0.0347
	电信基础	人均电信业务总量	正向	0.2011
	手机基站基础	手机基站数量	正向	0.6372

2.2.3 控制变量

本研究以人均GDP、城镇化率、政府干预程度、科技创新能力等指标为控制变量^[37,46]。其中,人均GDP(a_1)用于反映城乡经济发展水平;城镇化率(a_2)反映城乡发展水平;政府干预程度(a_3)一般而言是与市场化水平相反的指标,采取地方财政一般预算内支出占GDP的比重衡量;科技创新能力(a_4)采用当年数字经济专利授权数量来衡量。引入计量模型时,考虑各控制变量的量纲不一致,将各个控制变量进行标准化处理。

3 结果分析

3.1 基准回归分析

表2为数字基础设施影响城乡融合发展的基准回归分析结果。列(1)~(5)依次展示了未添加与逐步加入控制变量后的回归结果。由表2可知,无论是否加入控制变量,数字基础设施对城乡融合发展的估计系数始终在1%水平上显著为正,表明数字基础设施对城乡融合发展具有显著的正向推动作用。这一结果与现有研究一致,数字基础设施通过消除城乡信息壁垒、打破地理空间局限、促进产业多业态发展,实现城乡融合发展。

表2 基准回归结果

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	$\ln U_{it}$				
$\ln D_{it}$	0.078*** (4.71)	0.079*** (5.01)	0.075*** (4.80)	0.074*** (4.74)	0.079*** (5.15)
a_1		0.104*** (6.03)	0.107*** (6.22)	0.107*** (6.36)	0.100*** (5.76)
a_2			0.032* (1.82)	0.022 (1.16)	0.044** (2.44)
a_3				-0.024 (-1.64)	-0.021 (-1.52)
a_4					-0.043*** (-3.94)
常数项	-3.097*** (-62.23)	-3.092*** (-64.74)	-3.104*** (-65.60)	-3.108*** (-66.01)	-3.091*** (-66.23)
观测值	3,267	3,267	3,267	3,267	3,267
R-squared	0.966	0.967	0.967	0.967	0.967
id FE	YES	YES	YES	YES	YES
year FE	YES	YES	YES	YES	YES

注:括号内为稳健标准误,***、**和* 分别表示回归结果在1%、5%和10%置信水平下通过显著性检验。表3、表4、表6同。

3.2 内生性问题与稳健性检验

数字基础设施与城乡融合之间可能存在一定的内生性关系,为验证数字基础设施促进城乡融合发展这一研究结果是否在不同条件下保持一致,采用剔除异常值、剔除直辖市与工具变量等方法进行稳健性检验,确保实证结果稳健。

3.2.1 剔除异常值

为减少特殊城市和特殊时间异常值的干扰,参考毛艳华等人^[46]的思路,对样本数据进行1%缩尾处理后再次进行回归。由表3列(1)结果可知,系数依然为正且显著,说明前文结果稳健。

3.2.2 剔除直辖市

考虑到直辖市较高的数字基础设施建设能力与经济发展水平,本研究剔除北京市、天津市、上海市、重庆市等直辖市数据,得到相应回归结果。如表3列(2)结果显示,系数依然为正且显著,说明前文结果稳健。

3.2.3 工具变量法

考虑数字基础设施与城乡融合发展之间可能存在内生性问题,借鉴苏春红等人^[47]的做法,将核心解释变量数字基础设施与所有控制变量均滞后一期,纳入模型进行回归分析。由表3列(3)结果可知,数字基础设施的滞后一期变量对城乡融合发展仍具有显著正向影响。

此外,本研究以各城市的地形起伏度作为工具变量,采用两阶段最小二乘法(2SLS)对模型进行估计。地形起伏度的高低影响数字基础设施的建设情况。但是作为自然地理特征,地形起伏度是外生给定的变量,与城乡融合发展水平无关。考虑城市地形起伏度为截面数据,借鉴Nunn等人^[48]的研究方法,将各城市坡度与上一年互联网宽带接入用户数分别相乘构造的交互项作为工具变量。由表3列(4)结果可知,工具变量通过不可识别检验和弱工具变量检验,表明所选工具变量合理。考虑内生性问题后,数字基础设施的回归系数仍显著为正,可以认定回归模型稳定且结果可信。

表3 稳健性检验结果

变量名称	剔除异常值	剔除直辖市	滞后一期	工具变量法
	(1)	(2)	(3)	(4)
	$\ln U_{it}$	$\ln U_{it}$	$\ln U_{it}$	$\ln U_{it}$
$\ln D_{it}$	0.078*** (4.96)	0.080*** (4.94)	0.046*** (2.94)	0.344*** (5.33)
α_1	0.097*** (6.34)	0.100*** (5.80)	0.084*** (5.06)	0.100*** (4.80)
α_2	0.043** (2.43)	0.041** (2.22)	0.023 (1.34)	0.021 (1.08)
α_3	-0.035* (-1.85)	-0.022 (-1.53)	-0.009 (-1.17)	-0.015 (-1.53)
α_4	-0.045** (-2.30)	-0.044*** (-3.60)	-0.054*** (-6.03)	-0.053*** (-5.65)
Constant	-3.099*** (-65.49)	-3.110*** (-63.27)	-3.150*** (-66.05)	-2.422*** (-10.20)
Kleibergen-Paap rk LM statistic				50.765 [0.0000]
Kleibergen-Paap Wald rk F statistic				80.388 {16.38}
Hansen J statistic				0.000
观测值	3267	3223	2970	3267
R-squared	0.968	0.966	0.970	0.715
id FE	YES	YES	YES	YES
year FE	YES	YES	YES	YES

注:()内为稳健标准误,[]内为P值,{}内为Stock-Yogo弱识别检验10%水平上的临界值。

4 机制检验与异质性分析

4.1 机制检验

为探究在数字基础设施促进城乡融合发展的过程中,其他可持续发展目标所起到的协同促进或潜在失衡的作用,本研究使用中介效应模型,从经济、社会、环境三个维度选取城乡碳排放强度、城乡教育水平和城乡污染水平等中介变量进行机制检验。这些指标在一定程度上体现了SDG13、SDG4、SDG3的核心要求。

4.1.1 城乡碳排放强度(M1)

数字基础设施深度融入企业发展的各个层面,通过精准管理企业能源消耗、推动企业绿色发展转型,降低碳排放、优化绿色生产环境,吸引就业人才,实现经济转型升级,从而推动城乡在经济层面的融合发展。碳排放强度是评估能源利用效率、衡量气候变化行动效果的重要指标之一,碳排放强度越低,说明地区能够以更少的能源资源创造出更高的经济价值,能有效衡量区域经济的能源利用效率。降低碳排放强度可以直接减少温室气体排放,助力减缓全球气候变暖,并推动区域经济向低碳模式转型。这不仅契合可持续发展目标13中关于气候行动的核心要求,也为城乡经济走向资源高效的可持续融合发展道路提供了清晰路径。参考骆行等人^[49]的研究,用各城市的碳排放量除以各城市的地区生产总值计算得出碳排放强度,对其取对数后作为中介变量纳入模型计算。

假设1:经济层面,数字基础设施通过降低城乡碳排放强度,促进城乡融合发展。

表4列(2)与列(3)展示了以碳排放强度作为中介变量的检验结果。从分析结果来看,数字基础设施与城乡碳排放强度呈显著负相关,并在数字基础设施促进城乡融合发展过程中,城市碳排放起阻碍作用。即,数字基础设施的建设有助于降低城乡碳排放强度,由此促进城乡融合发展。具体而言,数字基础设施建设的完善,能够促使数字技术应用于企业生产消费的各个环节,提高能源使用效率、优化产业结构、创新绿色低碳发展模式,降低城乡碳排放强度,实现城乡融合发展。因此,数字基础设施通过降低城乡碳排放强度来促进城乡融合发展,为城乡融合发展提供新的动力和路径。

4.1.2 城乡教育水平(M2)

数字基础设施的不断完善促进线上教育发展,有助于实现教育资源在城乡间的全面覆盖与优化配置。这一过程不仅促进知识的广泛共享,还显著提高城乡居民的受教育程度,增强人才竞争力,为城乡经济的融合发展提供了有力支撑。本研究采用人均教育支出的对数来量化城市在提供优质教育方面的投入程度。教育水平越高意味着该地区在教育方面的投入越大,更有可能提供高质量的教育资源和环境,有助于实现可持续发展目标4中关于提供优质教育的核心要求。

假设2:社会层面,数字基础设施通过提高城乡教育水平,促进城乡融合发展。

表4列(4)与列(5)是以教育水平作为中介变量的检验结果。从结果上看,数字基础设施与城乡教育水平呈显著正相关,并在数字基础设施促进城乡融合的过程中,城乡教育水平具有正向的促进作用。具体而言,数字基础设施建设带来的互联网平台全覆盖,线上教育的城乡普及程度提高;在打破了城乡信息壁垒、推动乡村教育发展、缩小城乡教育差距的同时提高了城乡教育水平;提高乡村居民的受教育程度,提升其数字素养和技能,增强人才竞争力;推动城乡融合,促进城乡经济社会协同发展。因此,数字基础设施通过提升教育水平,为城乡融合发展提供了新的动力和路径。

4.1.3 城乡污染水平(M3)

数字基础设施建设带来的数字化发展通过提升能效、减少碳排放、创新环保技术、降低PM2.5等城市污染物的排放,优化资源配置,推动产业升级,促进城乡环境改善和城乡融合发展。PM2.5的严重污染对人类福祉乃至生命构成威胁,将其作为衡量城市健康水平的一个重要指标,体现了可持续发展目标3中关于健康福祉的核心要求。因此采用PM2.5含量来衡量城乡污染水平^[50]。

假设3:环境层面,数字基础设施通过降低城乡污染水平,促进城乡融合发展。

表4列(6)与列(7)是以城乡污染水平作为中介变量的检验结果。由检验结果可知,数字基础设施水平与城乡污染呈显著负相关,并在数字基础设施促进城乡融合的过程中,城乡污染水平具有一定的阻碍作用。即,数字基础设施建设有助于降低城乡污染水平,进而促进城乡融合发展。具体而言,数字基础设施的建设

通过推动产业和社会的绿色发展,减少城乡间PM2.5含量,从而减少城乡污染,为城乡融合发展创造良好的生态环境,有力推动城乡协调发展。因此,数字基础设施不仅改善城乡污染水平,还促进城乡融合,为城乡融合发展提供新的动力和路径。

表4 机制检验

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	$\ln U_{it}$	$M1$	$\ln U_{it}$	$M2$	$\ln U_{it}$	$M3$	$\ln U_{it}$
$\ln D_{it}$	0.079*** (5.15)	-0.045** (-2.40)	0.072*** (4.93)	0.066*** (5.22)	0.063*** (4.30)	-2.246*** (-5.15)	0.074*** (4.81)
$M1$			-0.162*** (-4.91)				
$M2$					0.244*** (5.62)		
$M3$							-0.002*** (-2.89)
$a1$	0.100*** (5.76)	-0.033 (-0.93)	0.094*** (6.09)	0.014 (0.57)	0.096*** (5.04)	-2.289*** (-3.21)	0.094*** (5.58)
$a2$	0.044** (2.44)	-0.322*** (-10.11)	-0.008 (-0.39)	0.132*** (7.62)	0.012 (0.64)	-0.314 (-0.52)	0.043** (2.40)
$a3$	-0.021 (-1.52)	0.100** (2.01)	-0.005 (-0.61)	0.045*** (5.44)	-0.032** (-2.43)	-0.094 (-0.33)	-0.021 (-1.51)
$a4$	-0.043*** (-3.94)	0.007 (0.63)	-0.042*** (-3.71)	-0.010 (-0.68)	-0.040*** (-3.10)	-0.750 (-1.38)	-0.045*** (-4.36)
Constant	-3.091*** (-66.23)	0.081 (1.44)	-3.078*** (-68.22)	7.565*** (198.96)	-4.937*** (-15.22)	34.954*** (26.51)	-3.005*** (-52.78)
id FE	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
year FE	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
观测值	3267	3267	3267	3267	3267	3267	3267
R-squared	0.967	0.977	0.968	0.914	0.969	0.935	0.968

4.2 异质性检验

为考察数字基础设施对城乡融合发展的影响是否存在异质性,本研究依据城市所在区域和城市规模等级进行分组回归,分析其异质性特征。

4.2.1 基于不同区域的异质性检验

参考谭丹等人^[51]的研究,将各城市分为东部、中部、西部地区进行分组回归分析,结果如表5列(1)~(3)所示。并计算出各区域数字基础设施与城乡融合水平值(表6)。可以看出,数字基础设施对全部区域均存在显著促进作用,正向影响强度由大到小依次为中部、东部和西部地区。原因可能是中部地区的城乡融合水平较低,数字基础设施建设带来的边际提升效应更强。而东部区域原本拥有最高的城乡融合水平,因此数字基础设施在提升该区域城乡融合水平方面的作用相对有限。西部地区数字化与城乡融合水平最低,这反映出该区域的数字化基础设施建设相对滞后,可能是因为西部地区社会经济发展基础薄弱,难以支撑数字基础设施建设,因而数字基础设施在推动城乡融合水平提升方面的作用较为局限。

4.2.2 基于城市规模等级的异质性检验

借鉴方创琳^[52]的研究方法,将各城市2012—2022年的人口取平均值,并按照人口规模大小分为1000万

人以上、500万~1000万人、100万~500万人与10万~100万人四种类型,城市规模异质性分析结果如表5列(4)~(7)所示。不同规模等级的城市中,只有城市人口在500万~1000万人与100万~500万人的数字基础设施对城乡融合具有显著的促进作用。其中,人口为500万~1000万人的城市,其促进效应更突出。可能是城市人口1000万人以上和10万~100万人的城市的样本量较小,无法体现正确的回归结果;且城市人口在500万~1000万人的城市中,其数字基础设施建设较完善,公共服务设施配套较齐全,能更有效地将数字基础设施转化为城乡融合发展的推动力。

表5 不同区域及城市规模等级的异质性分析

变量名称	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
	$\ln U_{it}$						
$\ln D_{it}$	0.074*** (3.41)	0.162*** (4.24)	0.073*** (2.94)	0.063 (0.68)	0.069* (1.79)	0.064*** (3.62)	-0.005 (-0.14)
α_1	0.031 (1.31)	0.094*** (4.26)	0.159*** (5.92)	0.057 (0.56)	0.043 (1.35)	0.086*** (4.84)	0.050 (0.90)
α_2	0.042 (1.41)	0.011 (0.43)	0.056 (1.60)	0.155* (2.12)	0.050 (1.06)	0.017 (0.76)	0.017 (0.30)
α_3	0.004 (0.19)	-0.030 (-1.26)	-0.023 (-1.24)	0.070* (2.02)	-0.001 (-0.10)	-0.036 (-1.58)	-0.076** (-2.98)
α_4	-0.081*** (-4.82)	0.020** (2.24)	-0.027** (-2.03)	-0.201*** (-5.69)	-0.059*** (-2.72)	-0.007 (-0.62)	0.019 (0.58)
Constant	-2.548*** (-41.95)	-2.994*** (-25.86)	-3.548*** (-43.95)	-1.831*** (-9.59)	-2.795*** (-24.91)	-3.349*** (-60.60)	-3.495*** (-34.92)
观测值	1,111	1,133	1,023	154	825	2,145	143
R-squared	0.974	0.953	0.936	0.953	0.964	0.958	0.979
id FE	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES
year FE	YES	YES	YES	YES	YES	YES	YES

表6 分地区数字基础设施和城乡融合发展水平

变量	东部区域	中部区域	西部区域	500万~1000万人	100万~500万人
数字基础设施水平	0.0823	0.0596	0.0513	0.0720	0.0535
城乡融合发展水平	0.0846	0.0370	0.0288	0.0650	0.0366

5 结论与讨论

5.1 结论

本研究利用中国297个城市2012—2022年的样本数据,构建“人-空间-产业”维度的城乡融合指标体系,探讨数字基础设施对城乡融合的影响效应,并考查健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)与气候行动(SDG13)等可持续发展目标在数字基础设施促进城乡融合发展过程中所起的中介作用。结论如下:

(1)数字基础设施对城乡融合发展具有显著的正向促进作用,其有效促进了城乡的经济活动平衡、产业的高质量转型升级、城乡居民生活的平衡等,从而推动人、产业、空间在经济、社会、环境等多维度的城乡融合发展。

(2)数字基础设施对城乡融合发展的影响效应存在明显区域差异,具体表现为数字基础设施对各地区城乡融合发展的促进作用大小依次为中部、东部和西部地区;城市人口在500万~1000万人与100万~500万

人的城市,数字基础设施对城乡融合发展有显著促进作用,且在城市人口500万~1000万人的城市中促进作用更强。

(3)数字基础设施能促进健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)与气候行动(SDG13)等可持续发展目标的实现,且这些可持续发展目标在数字基础设施促进城乡融合发展的过程中均起到促进作用。数字基础设施在一定程度上能够降低城乡空气污染、提升城乡教育水平并降低城乡碳排放强度,进而促进城乡融合发展。实证检验了数字基础设施与可持续发展目标之间存在相关关系、可持续发展目标之间存在协同关系。

5.2 讨论

数字基础设施作为数字时代发展的关键支撑,潜移默化地影响着城乡之间的要素流动。其构建了跨越地理界限的高效技术平台,为城乡经济活动的转移提供有力支持;与城乡各要素相结合形成以数字要素为支撑的城乡新业态,推动城乡产业的多元化发展;通过互联网信息平台,实现城乡之间信息的自由交互,促进城乡沟通与信息共享。数字基础设施以及支撑其运行的数字技术等有效促进了城乡经济活动转移、产业业态多元化发展、农村技术水平提高、城乡居民生活平衡等。最终,“人-空间-产业”多层次要素快速流动并与数字要素交互,形成数字基础设施在经济、社会、环境层面促进城乡融合发展的路径。

在以往关于数字基础设施与城乡融合发展的研究中,中介机制探讨多集中于经济或生产要素通道,忽视了支撑要素流动的社会经济环境条件。本研究结合可持续发展目标的概念框架,从社会、经济、环境等维度选取相关指标,既发现了数字基础设施促进城乡融合在社会、经济、环境等方面的发展路径,又证实了数字基础设施作为推动可持续发展的有力工具以及可持续发展目标之间的协同作用。具体而言,数字基础设施能够促进多个可持续发展目标的实现,包括城乡污染水平、城乡教育水平、城乡碳排放强度以及城乡融合。这些可以代表健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)、气候行动(SDG13)与社会平等(SDG10)等可持续发展目标。具体影响路径为数字基础设施通过促进健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)、气候行动(SDG13)等可持续发展目标的实现来推动城乡融合。各个可持续发展目标协同作用,为城乡融合发展提供新的路径,也为实现可持续发展提供多方位的思考。

综上所述,提出以下建议:(1)分区域加强数字基础设施建设。各地区应根据自身特点,制定差异化数字基础设施建设策略。东部地区应积极探索数字基础设施创新平台,建设算力、数据中心等高新数字基础设施,探索数字要素在城乡融合中的创新应用,进一步挖掘城乡融合的潜力;中部地区在重点加强数字基础设施建设的同时,应积极探索城乡要素与数字要素的深度融合模式,形成城乡数字化融合发展的有效路径,并将其转化为可推广的经验,进一步巩固数字基础设施对城乡融合发展的促进作用;西部地区需克服地理环境和社会经济的不利因素,重点聚焦能破除信息壁垒、跨越数字鸿沟的关键领域。以数字技术为杠杆,促进城乡融合发展。(2)加强国际合作与推动可持续发展。数字基础设施在促进城乡融合发展的过程中,与健康福祉(SDG3)、优质教育(SDG4)、气候行动(SDG13)等多项联合国可持续发展目标(SDGs)高度关联、相互嵌套,本质上是多目标协同推进的系统性工程。不同可持续发展目标之间既存在正向协同效应,又可能存在权衡作用。因此,在推进数字基础设施建设与城乡融合发展过程中,应系统剖析数字基础设施在经济、社会、环境等维度的协同与权衡关系,确定多个可持续发展目标之间的优先事项,以实现系统整体效益最优。在依托数字基础设施提升城乡融合水平的同时,统筹兼顾经济、社会与环境等多维度的可持续发展目标,推动各项目标协同共进,最终形成更高质量、更可持续的城乡融合发展格局。

参考文献:

- [1] 刘彦随.中国新时代城乡融合与乡村振兴[J].地理学报,2018,73(04):637-650.
- [2] 席广亮,甄峰,方创琳,等.形流融合视角的都市圈国土空间优化与协调发展[J].地理学报,2025,80(02):272-287.
- [3] 刘彦随,龙花楼,李裕瑞.全球城乡关系新认知与人文地理学研究[J].地理学报,2021,76(12):2869-2884.
- [4] 杜国明,刘美.基于要素视角的城乡关系演化理论分析[J].地理科学进展,2021,40(08):1298-1309.
- [5] 陈坤秋,龙花楼.中国土地市场对城乡融合发展的影响[J].自然资源学报,2019,34(02):221-235.
- [6] 甄峰,席广亮,张姗姗,等.智慧城市人地系统理论框架与科学问题[J].自然资源学报,2023,38(09):2187-2200.
- [7] WANG J L, LIU Y, WANG W L, et al. How does Digital Transformation Drive Green Total Factor Productivity? Evidence from Chinese Listed Enterprises[J].Journal of Cleaner Production, 2023, 406: 136954.

- [8] ZHU Y H, XU Y Q, YIN S G. How does Digital Technology Innovation Drive Synergies Forreducing Pollution and Carbon Emissions?[J].Sustainable Cities and Society,2024,116:105932.
- [9] QIN B T, YU Y W, GE L M, et al. The Role of Digital Infrastructure Construction on Green City Transformation : Does Government Governance Matters?[J].Cities,2024,155:105462.
- [10] LIAO K C, LIU J. Digital Infrastructure Empowerment and Urban Carbon Emissions : Evidence from China[J]. Telecommunications Policy,2024,48(06):102764.
- [11] ZHOU F X, LI L, WEN H W. Regional Digital Infrastructure and Carbon Neutrality: A Technology-Structure-Efficiency Perspective[J]. Energy Strategy Reviews,2024,56:101583.
- [12] HE Z M, CHEN M L, GU D M. How Digital Village Construction Affects to the Effectiveness of Rural Governance? — Research on the NCA and QCA Methods[J]. Cities,2025,156:105514.
- [13] KYRIAKOPOULOS P. Revisiting Research on Firm-Level Innovation in Rural Areas: A Systematic Literature Review and Future Research Directions[J]. Journal of Rural Studies,2024,111:103437.
- [14] SCHÄFER S, Henn S. Recruiting and Integrating International High-skilled Migrants-towards a Typology of Firms in Rural Regions in Germany[J]. Journal of Rural Studies,2023,103:103094.
- [15] CAO H, CHEN C, CHEN J L, et al. Differentiation of Urban-Rural Interface and its Driving Mechanism: A Case Study of Nanjing, China[J]. Land Use Policy,2024,140:107090.
- [16] CATTIVELLI V. Where is the City? Where is the Countryside? Assessing the Methods for the Classification of Urban, Rural, and Intermediate Areas in Europe[J]. Journal of Rural Studies,2024,109:103288.
- [17] 张文斌,张志斌,董建红,等. 迈向城乡共治:改革开放以来城乡关系演变解读[J].地理科学进展,2021,40(05):883-896.
- [18] 段锴丰,施建刚,吴光东,等. 城乡融合系统:理论阐释、结构解析及运行机制分析[J].人文地理,2023,38(03):1-10,68.
- [19] 王效梅,李繁荣,王晓东. 城乡融合发展视野下山西乡村振兴路径探索[J].人文地理,2022,37(03):131-139.
- [20] 崔树强,周国华,李晓青,等. “人-地-业”协调视角下长株潭城市群城乡融合发展仿真模拟[J].地理科学进展,2024,43(07):1337-1354.
- [21] 郑瑜晗,龙花楼. 中国城乡融合发展测度评价及其时空格局[J].地理学报,2023,78(08):1869-1887.
- [22] 代亚强,张玥,柯新利,等. 乡村地域多功能的空间关联网络结构特征及其对城乡融合发展的影响——以河南省为例[J]. 自然资源学报,2023,38(08):2059-2075.
- [23] 舒季君,周建平,陈亦婷,等. 中国省域数字经济的空间演化特征及其城乡融合效应[J].经济地理,2022,42(08):103-111.
- [24] 赵伟佚,潘玮,李裕瑞. 县域内城乡融合发展:理论内涵与研究进展[J].地理研究,2023,42(06):1445-1464.
- [25] ZHAN L Y, WANG S J, XIE S X, et al. Spatial Path to Achieve Urban-Rural Integration Development-Analytical Framework for Coupling the Linkage and Coordination of Urban-Rural System Functions[J]. Habitat International,2023,142:102953.
- [26] 王凯,谭佳欣,甘畅. 湘西地区旅游发展与城乡融合协同演化及影响因素研究[J].地理科学进展,2023,42(08):1468-1485.
- [27] 周德,戚佳玲,钟文钰,等. 城市群城乡融合发展:测度评价、障碍因素与驱动因素[J].地理研究,2023,42(11):2914-2939.
- [28] 郭庆宾,马梦瑶,程叶青. 海南自由贸易港城乡融合发展水平的时空特征及其驱动机理[J].经济地理,2024,44(12):62-71.
- [29] 席广亮,甄峰,项欣怡,等. 智能技术作用下的城市生活服务供需匹配研究进展与展望[J].地理科学进展,2023,42(11):2231-2241.
- [30] 杨忍,林元城. 论乡村数字化与乡村空间转型[J].地理学报,2023,78(02):456-473.
- [31] 熊云飏,代宇杰. 数字经济与城乡融合发展:理论机制与实证检验[J].干旱区资源与环境,2024,38(06):1-10.
- [32] NDUBUISI G, OTIOMA C, TETTEH G K. Digital Infrastructure and Employment in Services: Evidence from Sub-Saharan African Countries[J].Telecommunications Policy,2021,45:102153.
- [33] LI X, YANG G, SHAO T H, et al. Does Digital Infrastructure Promote Individual Entrepreneurship? Evidence from a Quasi-Natural Experiment on the “Broadband China” Strategy[J]. Technological Forecasting and Social Change,2024,206:123555.
- [34] SUN Y, MIAO Y L, XIE Z J, et al. Drivers and Barriers to Digital Transformation in Agriculture: An Evolutionary Game Analysis based on the Experience of China[J]. Agricultural Systems,2024,221:104136.
- [35] 刘晨光. 中国式现代化进程中数字经济赋能农民农村共同富裕:逻辑机理与实现路径[J].农村经济,2024,(04):13-25.
- [36] CORRADO I, ANGELO B, DANILO M, et al. Information and Communication Infrastructures and New Business Models in Rural Areas:The Case of Molise Region in Italy[J].European Countryside,2019,11:2019-0027.
- [37] 刘修岩,王雨昕. 数字基础设施与中国城市的空间重构[J].经济地理,2024,44(04):55-63.
- [38] ZHAO L, RAO X, LIN Q W. Study of the Impact of Digitization on the Carbon Emission Intensity of Agricultural Production in

China[J].Science of the Total Environment,2023,903:166544.

- [39] MA Z, ZHANG P D. Understanding how Digital Infrastructure Construction could Promote Sustainable Development [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 117: 105977.
- [40] 王琴,丁可可,雷俐,等.数字基础设施、要素配置效率与城乡融合发展[J].调研世界,2024,(09):67-77.
- [41] 赵华平,袁方玉,孟宏伟.数字基础设施赋能城乡融合发展的机制研究[J].城市问题,2023,(12):16-28.
- [42] 冷硕峰,席广亮,甄峰,等.基于企业股权关联的长三角数字经济网络演变和空间扩展模式研究[J].人文地理,2024,39(03):81-91,182.
- [43] 钞小静,廉园梅,元茹静,等.数字基础设施建设与产业链韧性——基于产业链恢复能力数据的实证分析[J].数量经济技术经济研究,2024,41(11):112-131.
- [44] NIU B, GE D Z, SUN J W, et al. Multi-scales Urban-Rural Integrated Development and Land-Use Transition: The Story of China[J]. Habitat International, 2023, 132: 102744.
- [45] PAN W, WANG J, LI Y R, et al. Spatial Pattern of Urban-Rural Integration in China and the Impact of Geography[J]. Geography and Sustainability, 2023, 4(04): 404-413.
- [46] 毛艳华,张超,李松.数字经济对制造业产业结构升级的影响研究——以我国三大城市群为例[J].城市问题,2024,(01):4-15.
- [47] 苏春红,李真.数字经济促进城乡融合发展了吗?——基于中国285个地级市的实证研究[J].经济社会体制比较,2023,(03):27-39.
- [48] NUNN N, QIAN N. US Food Aid and Civil Conflict[J]. The American Economic Review, 2014, 104: 1630-1666.
- [49] 骆行,刘子俊,田云.数字经济对资源型城市低碳转型的影响及作用路径[J].中国人口·资源与环境,2024,34(06):56-64.
- [50] 何昱,缪丽娟,顾伟男,等.基于不同城市规模的长三角地区PM2.5质量浓度变化及其影响因素[J].地理科学,2024,44(08):1426-1436.
- [51] 谭丹,黄贤金.我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J].中国人口·资源与环境,2008,(03):54-57.
- [52] 方创琳.中国城市发展方针的演变调整与城市规模新格局[J].地理研究,2014,33(04):674-686.

Research on the Impact and Mechanisms of Digital Infrastructure on Urban-Rural Integration

FENG Chun-ye¹, XI Guang-liang^{1,2*}, NIU Yue^{1,3}, WUMAIERAILI·Aimaitikali⁴

(1.School of Architecture and Urban Planning, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu, 210093, China;
2.Key Laboratory of Urban AI and Green Built Environment of Provincial Higher Education Institutes, Nanjing,
Jiangsu, 210093, China; 3.School of Geographical Sciences, Qinghai Normal University, Xining, Qinghai, 810001,
China; 4.School of Business, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang, 830017, China)

Abstract: Digital economy is comprehensively reshaping the pattern of urban and rural development, and digital infrastructure, as its key support, is of great significance in promoting urban-rural integration. As urban-rural integration is an important element of sustainable development, exploring the role of digital infrastructure on urban-rural integration provides new ideas for achieving sustainable urban-rural development. Therefore, based on data from 297 Chinese cities from 2012 to 2022, a two-way fixed-effects model is applied to analyse the role of digital infrastructure on urban-rural integration development. the role played by several SDGs, such as health and well-being (SDG3), quality education (SDG4), and climate action (SDG13), in this process is also explored. The results of the study show that digital infrastructure has a positive and significant impact on the process of urban-rural integration; that the SDGs of health and well-being (SDG3), quality education (SDG4), and climate action (SDG13) all contribute to the process of urban-rural integration; and that there are regional differences in the contribution of digital infrastructure to urban-rural integration.

Keywords: Digital infrastructure; Urban-Rural integration; Sustainable development; Moderating role; Spatial heterogeneity