

# 虚拟集聚能否促进城市绿色发展?

陈 芳 王溪裕\*

**摘要:**作为数字经济孵化出的产业组织新形态,虚拟集聚能否成为城市空间维度绿色发展的新引擎值得关注。本文基于2013—2020年中国279个城市的面板数据,利用区位熵和地理距离外溢衰减指数测度虚拟集聚水平,并系统考察了虚拟集聚在城市层面的环境效应。研究表明:虚拟集聚对城市绿色发展的影响呈现先抑制后促进的U型关系,且这一结论在一系列检验后依然稳健;技术创新、产业结构优化和市场整合是其影响路径。进一步分析发现:虚拟集聚对东部、中部地区以及城市群中城市绿色发展的U型影响更加显著;此外,虚拟集聚有效降低了省界城市的环境污染,成为破除边界污染的突破口。因此,本文建议加快核心数字技术创新,着力推动产业集群数字化转型;利用数字技术促进产业结构优化,破除市场一体化壁垒;因地制宜布局数字基础设施,加强网络基础设施建设,培育绿色发展新动能。

**关键词:**虚拟集聚;绿色全要素生产率;边界污染;东数西算

## 一、问题的提出

产业集聚推动了经济高速发展,成为中国经济社会发展重要引擎,同时带来了资源消耗严重和城市环境污染等突出问题(林伯强、谭睿鹏,2019)。传统集聚的模式是产业链上下游企业为享受生产的规模收益和溢出效应在地理空间内形成集聚,这有利于密切企业之间的联系,提高企业的经济效益。但由于地理空间的限制,当集聚的企业达到一定数量后,就会出现过度集聚现象,此时集聚区内的土地会更加稀缺,交通更加拥堵,集聚区内的环境承载力以及污染治理成本也会大大增加,城市绿色发展面临阻碍。如何补齐产业集聚的环境治理短板,打造城市绿色发展增长极,是践行党的二十大报告关于推动形成绿色低碳生产和生活方式的关键。而数字经济与实体经济的融合发展为解决这一问题提供了可能的新路径。党的二十

---

\*陈芳,安徽大学经济学院,邮政编码:230601,电子邮箱:chenfang@ahu.edu.cn;王溪裕(通讯作者),安徽大学经济学院,邮政编码:230601,电子邮箱:495590703@qq.com。

本文系国家社科基金一般项目“长江经济带跨界污染协同治理及政策研究”(20BJL101)的阶段性成果。感谢匿名审稿专家的宝贵建议。文责自负。

大报告提出要加快数字经济发展,促进实体经济与数字经济深度融合,党的二十届三中全会进一步指出要健全数字经济与实体经济融合制度。在此背景下,互联网、大数据、云计算、人工智能等新一代数字技术迅猛发展,并不断融入生产和消费过程。数字技术的广泛应用可能会使得上下游企业之间的依存度降低,企业与企业之间的地理空间关联变得没那么紧密,进而促使企业间的集聚模式发生变化,开始由地理空间集聚转向以网络平台为载体的线上集聚,即所谓的“虚拟集聚”。早期的虚拟集聚主要强调生产的协同化和组织网络化,而随着数字技术的发展与应用,学界对虚拟集聚的研究也不断深入。虚拟集聚既是产业数字化的表征,又是传统产业集聚的丰富与外延,兼具传统产业集聚的正外部性且能够打破地理空间的限制性(刘烨等,2023)。由于网络空间的容载量大且进入门槛低,因此虚拟集聚平台可以容纳的企业数量巨大,进而能够缓解因过度集聚导致的环境污染问题。此外,虚拟集聚可以利用网络空间提高信息的传播速度,前沿的技术可以在企业间快速扩散并不断迭代,这不仅有利于企业实现绿色生产,也有利于治污技术的广泛应用。因此,相较于传统产业集聚,虚拟集聚在促进要素流动、提高资源配置效率及技术溢出等方面有独特优势,已成为数字经济背景下城市绿色发展的重要推动力。那么虚拟集聚能否克服传统产业集聚在城市层面环境效应的短板?其中的作用机制和影响路径又如何?这对于实现产业集聚与城市绿色发展和谐共赢,谱写新时代生态文明建设的新篇章具有重要的理论与现实意义。

## 二、文献综述

产业链上下游企业因规模收益递增和知识溢出效应在地理空间内形成集聚,这种基于供应链关系的集聚是传统产业集聚的典型形态。然而已有研究认为,传统产业集聚的外部性局限在一定的地理空间内,且外部性的作用存在空间上的“距离衰减”问题(Fujita & Ogawa, 1982)。而互联网、大数据、云计算、人工智能等新一代数字技术的迅猛发展有效消除了这一弊端,并延伸出虚拟集聚的概念。1977年,欧盟7所大学联合网络化课题研究小组最早提出了虚拟集聚(Virtual Industrial Cluster, VIE)的概念,虚拟集聚由某些参与虚拟企业的运作且具有一定特长的虚拟集合体构成(Molina et al., 2001)。国内关于虚拟集聚的研究随着数字技术的发展而逐渐深入。先进的数字技术降低了企业之间的地理空间关联程度,打破了产业集聚对地理空间临近的依赖,发展为一种线上线下融合的产业虚拟集聚新形态。虚拟集聚是以数据要素为核心、互联网平台为载体的新产业组织形态,是对传统产业集聚内涵、形式的延伸,具有空间无限化、数据资源化、生产柔性化、平台巨型化等特征(王如玉等,2018)。

关于虚拟集聚的测度,多数研究认为电子商务平台具有多重平台属性,能够促进产业集群向虚拟集聚演化,并结合自身研究采用了不同的衡量方法。如赵放等(2024)利用全国30个省份的电子商务交易额数据衡量数字经济视域下的虚拟集聚水平。也有研究基于地级市

现代服务业电子商务交易额和第三产业增加值数据,采用区位熵的方法对各地区虚拟集聚水平进行测度(张青、茹少峰,2021)。考虑到单一指标存在精准度量的缺陷,无法有效捕捉虚拟集聚对其他行业的渗透程度,段霞和张蔷薇(2023)从基建水平、应用水平和虚拟集聚水平三个方面选取15项城市层面的指标,采用熵值法测算产业数字化虚拟集聚的综合发展水平。鉴于虚拟集聚是数字经济背景下传统产业集聚发展出的新形态,其发展离不开数字技术的支持,结合现有研究对其内涵的界定以及数据可得性,本文借鉴刘烨等(2023)的做法,利用城市层面信息传输、计算机服务和软件业从业人员数据,在区位熵的基础上纳入地理距离外溢衰减指数对虚拟集聚水平进行测度。采用此法主要是考虑到虚拟集聚的溢出效应会通过网络空间辐射到周围其他城市,但融入数字平台的传统产业集聚才是虚拟集聚的基础,因此虚拟集聚的溢出效应在空间上也存在“距离衰减”问题。鉴于此,加入逆地理距离权重进行加权处理,可以更好将虚拟集聚与传统集聚区分开(刘烨等,2023)。

本文的研究源于产业集聚的环境效应研究。现有文献关于集聚对环境的影响无明确定论,总体来看,学界对于二者之间关系的研究形成了“环境恶化论”“环境改善论”以及“非线性关系论”等三种观点。“环境恶化论”认为产业集聚不利于地区绿色发展,主要原因是集聚带来的产出规模扩张会加剧资源消耗,从而使得集聚区内环境恶化。Virkanen(1998)利用芬兰南部地区的数据研究发现,工业集聚是导致该地区空气污染和河流污染的直接原因。此外,Ren等(2003)以及张可和豆建民(2013)的研究也发现产业集聚会导致集聚区内环境污染,包括大气污染、河流污染等各类型污染。“环境改善论”则认为产业集聚可以带来规模经济效应、技术溢出效应,而这些集聚的正外部性会通过技术进步与治污减排成本的降低改善区域环境(陈建军、胡晨光,2008;任晓松等,2020;刘禹圻、孙铁山,2024)。譬如,刘耀彬等(2024)利用长江经济带城市为样本进行研究后发现,数字产业集聚有利于实现减污降碳协同增效,而技术创新是主要原因。黄庆华等(2020)的研究也得出了类似结论。不同于以上两种线性观点,“非线性关系论”强调产业集聚对环境的影响存在复杂的作用机制。已有研究发现产业集聚对环境污染存在倒U型特征,即当产业集聚低于某一水平时,产业集聚加剧环境污染,当产业集聚水平超过该值时,产业集聚有利于改善环境污染(胡求光、周宇飞,2020;朱东波、李红,2021;孙鹏博等,2023)。但也有研究发现产业集聚与环境污染之间呈U型关系(李勇刚、张鹏,2013;及添正等,2023)。另有学者通过分析产业集聚阶段及其环境特征,证实制造业集聚与大气污染之间呈N型曲线关系(李伟娜等,2010;Wu et al.,2023)。现有文献对该问题的差异化结论引发更多视角去验证产业集聚的环境效应这一命题,尤其是数字经济打破产业的时空限制,延伸产业链条以及产业组织新形式。但尚未有文献对数字经济背景下产业集聚新形态的环境影响进行系统研究,该方面研究仍有深入探讨的空间。

与本文密切相关的一支文献是数字经济的环境效应研究。虚拟集聚作为数字经济背景

下产业组织的新形式,也遵循数字经济的环境效应作用路径。数字经济为降碳减排提供了契机,数字技术的应用可以促进再生能源发电成本的持续下降,并逐步替代化石燃料发电,从供给和需求端减少能源消耗,降低碳排放(陈晓红等,2021;佟家栋、张千,2023)。进一步探究发现,数字经济主要通过促进绿色技术创新助推企业实现绿色生产,推动能源消费绿色化,减少生产和消费过程中的能源消耗,实现碳排放的源头防控,降低城市碳排放水平(郭丰等,2022;廖小菲、申雨瑶,2024)。同时,数字经济与传统产业呈现不断融合发展的态势,推动产业结构向高级化、合理化转变,而产业结构升级可以提高资源利用效率,降低碳排放强度(陈芳、曹晓芸,2022;韩晶、姜如玥,2024)。究其原因,数字经济所依赖的信息通信技术正向作用于绿色经济增长,有助于改善碳排放和经济增长的关系(Nguyen et al., 2020; Ben et al., 2021)。然而,也有研究认为数字经济并非具有绿色低碳的天然属性,其发展不仅没有改变自然资源的使用偏好,反而加剧了对资源的依赖,引致对能源的需求量超过其节约量。同时,数字经济的发展会伴随数字基建的扩张和数字基础设施的更新换代,而这些数字基础设施的应用会引致电能消耗和能源消耗增加,最终增加碳排放(Dong et al., 2022; 白丽飞, 2023)。此外,也有研究通过实证分析发现,数字经济与碳排放之间呈倒U型曲线关系(Li & Wang, 2022; 郭爱君、张传兵, 2023),在数字经济发展初期,高投入、高成本引致碳排放水平升高,而随着数字经济不断发展成熟,投入要素不断产生正向净效应,碳排放水平显著降低。

随着数字技术对传统产业组织的不断创新优化,虚拟集聚为城市绿色发展打开了新“赛道”,但鲜有研究关注基于数字化的全新产业组织形态在城市层面的绿色效应,本文的研究正是对这一领域的补充。本文可能的增量贡献在于:第一,立足于表征产业组织新形态的虚拟集聚与城市绿色发展,系统检验了二者的内在作用机理,为有效释放数字经济的产业空间绿色效应提供了经验证据;第二,从技术创新、产业结构升级以及市场整合等视角探究了虚拟集聚对城市绿色发展的作用路径;第三,基于地理区位和空间组织形式的视角考察了虚拟集聚对城市绿色发展的差异化影响,为弥补传统地理集聚的环境短板提供了理论支撑。

### 三、理论分析与研究假说

#### (一)虚拟集聚对城市绿色发展的非线性影响

由于虚拟集聚的内在数字属性,其对城市绿色发展的影响在不同阶段可能表现出不同特征。初期,大量数字基础设施建设和数据中心应用是虚拟集聚发展的重要表现。这虽然在一定程度上有利于地区基础设施的更新和优化,提高资源空间配置和利用效率,但其对环境影响的正面效应尚未充分释放,并且数字技术和数字产业本身就是高耗能产业,虚拟集聚引致耗电量增加,能源消耗加剧不容忽视。譬如,阿里云服务器日耗电量占全杭州日耗电量的8%;全国的数据中心每年更是要消耗全社会发电量的1.5%~2.2%(史丹,2022)。因此,在发



展的初期阶段,虚拟集聚引致的耗能效应大于节能效应,抑制城市的绿色发展。而随着虚拟集聚发展不断成熟,物理世界、网络空间和生产关系网络的融合程度不断提高,虚拟集聚优化资源配置效率,缓解集聚拥塞效应的作用效果逐渐凸显,在发展的后期阶段,虚拟集聚对生态环境的红利效应占主导地位,促进了城市绿色发展。

综上分析,本文提出假说 H1:虚拟集聚对城市绿色发展的影响存在先抑制后促进的 U 型曲线关系。

## (二)虚拟集聚对城市绿色发展的影响机制

现有研究认为地理集聚的 MAR 外部性之一就是溢出效应,即地理集聚有利于集聚的企业获得相关行业发展的信息和知识(谭洪波、夏杰长,2022)。但已有研究无一例外地证明了溢出效应存在地理空间上的“距离衰减”(Fujita & Ogawa, 1982; Lucas & Rossi-Hansberg, 2002)。而虚拟集聚在具有传统地理集聚优势的同时,大大缩短了参与主体之间的“空间距离”和“心理距离”(陈小勇,2017),在一定程度上克服了“距离衰减”所导致的溢出效应空间阻滞问题,使得参与主体间的知识信息交互效率得到提高,促进了城市技术创新水平的提升。先进的技术能够提高资源使用效率,促进资源循环利用和污染防控,从而实现生产过程中的节能减排。同时,技术创新会引导产业的绿色化、智能化转型,推动形成可持续的生态化发展模式,为城市发展绿色转型注入持续动力。

虚拟集聚以互联网为载体,依托数字技术,带动了传统产业与数字产业的融合,催生出大量互联网关联产业和互联网渗透产业,推动新一轮产业变革,加快淘汰低效率、高污染产业,有效赋能产业结构优化升级。在数字经济背景下,产业结构优化升级不仅有利于促进劳动、资本、数据等要素的合理高效配置,减少资源错配的可能性,提升能源利用效率(陈芳,2016),发展低耗能高附加值的产业,还有利于优化产业空间布局,通过减少中介化的生产方式提高资源利用效率,减少非必要的污染。

虚拟转型使产业集聚有效减少了交通运输成本和信息互动成本(陈小勇,2017),商品服务和信息传输不再局限于特定的地理范围,位于不同地理空间的主体可以根据自身需求进行高效的互动,使得区域间市场一体化水平逐渐提高,并且跨平台的技术运用能够打破市场分割的藩篱,从而加快市场整合。而市场整合促进能源要素价格市场化,不仅有利于消除要素市场扭曲,提高能源使用效率(吕有金等,2021),而且有利于淘汰高耗能、高污染的产业。另外,市场整合程度的提高有助于构建地区间利益共同体。为实现这一目标,地区间的环保标准和环保政策逐渐接近或统一,避免高污染产业在地区间转移,有利于地区间开展环境污染的协同治理,从而有力提高城市的绿色发展水平。虚拟集聚对城市绿色发展的影响机制见图 1。

基于上述分析,考虑到区域发展差异性和虚拟集聚发展的阶段性特征,本文提出假说 H2:虚拟集聚通过对技术创新、产业结构优化、市场整合的非线性关系作用于城市绿色发展。

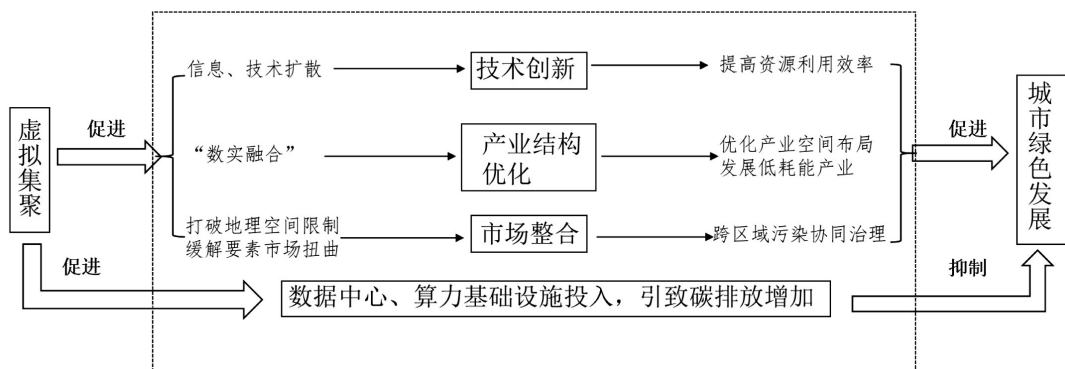


图1 虚拟集聚对城市绿色发展影响机制图

## 四、研究设计

### (一)模型构建

为探究虚拟集聚对城市绿色发展的影响,构建如下双向固定效应的基准回归模型:

$$Gtfp_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Va_{it} + \alpha_2 Va_{it}^2 + \alpha_3 \sum Control_{it} + u_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中,被解释变量  $Gtfp_{it}$  表示  $i$  城市在  $t$  年的绿色全要素生产率;核心解释变量  $Va_{it}$  表示  $i$  城市在  $t$  年的虚拟集聚水平;  $\sum Control$  为控制变量集;  $u_t$  为时间固定效应,  $\lambda_i$  为个体固定效应,  $\varepsilon_{it}$  为随机误差项。

为进一步探讨虚拟集聚对城市绿色发展产生影响的可能路径,借鉴林伯强和谭睿鹏(2019)的做法,构建如下模型实证考察虚拟集聚对城市绿色发展的影响及其作用途径:

$$Gtfp_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 Va_{it} + \alpha_2 Va_{it}^2 + \alpha_3 \sum Control_{it} + \alpha_4 M_{it} + u_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (2)$$

$$M_{it} = \beta_0 + \beta_1 Va_{it} + \beta_2 Va_{it}^2 + \beta_3 \sum Control_{it} + u_t + \lambda_i + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

### (二)变量测度与说明

#### 1.被解释变量

被解释变量为绿色全要素生产率( $Gtfp$ )。传统的DEA模型在测算效率时,往往会因径向和角度选择问题造成测算结果偏误。在存在非期望产出的情况下,能源消耗和环境污染在现实生活中往往是不可分开、相伴相随的径向关系,而除了能源消耗、污染排放之外的劳动、资本等生产要素间又是可分开的非径向关系。但DEA和SBM函数模型均不能处理径向和非径向同时存在的投入产出关系(周鹏飞等,2021)。基于此,既有研究提出了一种同时包含径向关系和非径向关系的混合距离函数模型(EMB),该模型可以在一定程度上弥补DEA和SBM函数模型的不足。同时,为了解决ML指数在规模报酬可变情况下规划无解、不具有循环性等问题,在各期共同全局前沿构造具备可传递性和可累乘性两个特点的基础上,Global

Malmquist-Luenberger(GML)指数被提出。因此,本文选取EBM模型与GML指数相结合测度城市绿色全要素生产率,以使测度结果更接近现实情况。借鉴已有研究(罗军,2023)的做法,本文构建包括资本(固定资本存量)、劳动力(年末总就业人数)与能源投入(全社会用电量)以及期望(GDP)与非期望产出(工业二氧化碳排放量、工业烟尘排放量、工业废水排量)的指标体系<sup>①</sup>。

## 2.解释变量

有关虚拟集聚( $Va$ )的测度,借鉴刘烨等(2023)的测度方法,本文利用区位熵指数以及地理距离外溢衰减指数对城市虚拟集聚水平进行测算。具体计算公式如下:

$$Va_{it} = \sum_j \frac{q_{it}/Q_{it}}{q_t/Q_t} d_{ij}^{-1} \quad (4)$$

其中,  $q_{it}$  和  $Q_{it}$  分别表示  $i$  城市  $t$  年的信息传输、计算机服务和软件业就业人数与全部就业人数,  $q_t$  和  $Q_t$  分别表示  $t$  年全部城市信息传输、计算机服务和软件业就业人数与全部就业人数。  $d_{ij}$  表示  $i$ 、 $j$  两个城市间的地理距离权重。

## 3.控制变量

借鉴已有研究(翟琮等,2022;庞瑞芝、王宏鸣,2023;杨刚强等,2023)的做法,本文控制变量设定如下:金融发展水平( $Fina$ ),用年末金融机构人民币各项贷款余额与地区生产总值的比值来表示;财政分权度( $Gov$ ),用政府公共预算收入与公共预算支出之比表示;教育支出( $Edu$ ),用教育支出占GDP比重表示;环境规制( $Er$ ),用工业烟粉尘排放量表示;科研支出( $Intech$ ),用财政支出费用中科学支出的对数表示;城市规模( $lnpop$ ),用年末总人口数的对数来表示。

## 4.机制变量

本文选取技术创新( $Ina$ )、产业结构优化( $Ind$ )和市场整合指数( $Mar$ )作为机制变量。其中,技术创新采用专利授权数量的对数值进行表示。产业结构优化以产业结构组间优化指数表示(梁雅楠、张成,2022),具体计算公式如下:

$$Ind = \sum_{m=1}^3 y_{imt} \times m \quad (5)$$

其中,  $Ind$  表示产业结构优化系数,  $y_{imt}$  表示  $i$  地区第  $m$  产业在  $t$  时期占地区生产总值的比重。该指标能反映三大产业比例关系的演进。

本文借鉴王昀和孙款款(2023)的研究方法,采用价格指数法测算城市层面的市场整合程度。具体公式如下:

$$Seg_{it} = \sum_{j=1}^{279} w_j \cdot \text{Var}(|\Delta Q_{ijt}^k| - |\overline{\Delta Q_i^k}|) \quad (6)$$

①使用全社会固定资产投资价格指数对城市固定资产投资总额进行平减处理,而后利用永续盘存法计算2013—2020年城市每年资本存量,折旧率取9.6%,以2013年为基期。

其中,  $Seg_{it}$  表示  $i$  城市在  $t$  年的市场分割指数,  $w_j$  表示城市  $j$  的权重,  $\Delta Q_{ijt}^k$  表示  $i$ 、 $j$  两个城市在  $t$  年第  $k$  类商品<sup>①</sup>对数比价格的差分形式,  $\left|\overline{\Delta Q_i^k}\right|$  为两两城市间第  $k$  类商品在  $t$  年所有  $\left|\Delta Q_{ijt}^k\right|$  的均值,  $Var$  表示取方差处理。最后, 借鉴毛其淋和盛斌(2012)的做法, 在所测得的市场分割指数的基础上构造城市市场整合程度的指数:  $Mar_{it}=[1/Seg_{it}]^{1/2}$ 。

(三)数据来源与说明

考虑到虚拟集聚是新一代数字技术与实体经济深度融合的空间组织形态(王如玉等, 2018), 而数字技术与实体企业融合主要从 2013 年开始(杨德明、毕建琴, 2019), 因此使用 2013 年之后的数据更具代表性。另外, 由于西藏和部分县级市数据缺失严重, 结合数据可得性原则, 本文最终选取 2013—2020 年 279 个城市面板数据作为研究对象。数据来自国家统计局网站、《城市统计年鉴》以及 EPS 数据库。其中, 商品价格指数数据来自《中国统计年鉴》、各城市统计年鉴以及各城市社会发展统计公报。变量的描述性统计见表 1。

表 1 变量的描述性统计

|       | 变量名      | 变量定义     | 样本量  | 均值     | 标准差   | 最小值   | 最大值    |
|-------|----------|----------|------|--------|-------|-------|--------|
| 被解释变量 | $Gtfp$   | 绿色全要素生产率 | 2232 | 0.987  | 0.064 | 0.667 | 1.498  |
| 解释变量  | $Va$     | 虚拟集聚     | 2232 | 0.831  | 0.484 | 0.200 | 4.655  |
| 中介变量  | $Ina$    | 技术创新     | 2232 | 6.017  | 1.762 | 0.693 | 11.583 |
|       | $Ind$    | 产业结构优化   | 2232 | 6.555  | 0.503 | 1.226 | 7.836  |
|       | $Mar$    | 市场整合指数   | 2232 | 8.142  | 8.539 | 0.511 | 76.720 |
| 控制变量  | $Fina$   | 金融发展水平   | 2232 | 2.604  | 1.248 | 0.67  | 21.301 |
|       | $lnpop$  | 城市规模     | 2232 | 5.905  | 0.701 | 2.996 | 8.136  |
|       | $Intech$ | 科研支出     | 2232 | 10.544 | 1.43  | 6.624 | 15.529 |
|       | $Edu$    | 教育支出     | 2232 | 0.035  | 0.018 | 0.009 | 0.149  |
|       | $Er$     | 环境规制     | 2232 | 9.535  | 1.206 | 4.025 | 14.964 |
|       | $Gov$    | 财政分权度    | 2232 | 0.45   | 0.219 | 0.057 | 1.541  |

①本文选取 16 类商品零售价格指数, 具体包括: 食品、饮料烟酒、服装鞋帽、纺织品、家用电器及音像器材、文化办公用品、日用品、体育娱乐用品、交通通信用品、家具、化妆品、金银饰品、中西药品及医疗保健用品、书报杂志及电子出版物、燃料、建筑材料及五金电料。



## 五、实证检验与结果分析

### (一)基准回归分析

表2第(1)列表明,虚拟集聚的一次项( $Va$ )回归系数显著为负,二次项( $Va\_sq$ )回归系数显著为正,表明虚拟集聚对城市绿色发展影响呈现显著的U型关系。第(2)列进一步加入控制变量,U型关系依旧显著。可能的原因是在产业实现虚拟集聚初期,大量资金和数字基础设施投入可能会占用地方有限的资源(张英浩等,2022),延缓了绿色发展进程;且部分数字技术及其数字产业本身就是高耗能的产业,在产业虚拟集聚程度较低时,其节能效应较弱,从而抑制了城市的绿色发展。当虚拟集聚水平超过拐点值后,经济效益产出的增加和环境负产出的减少,使规模经济效应与节能效应叠加释放,城市绿色发展水平持续提升,由此验证了假说H1。

表2 基准回归结果

| 变量       | (1)                 | (2)                 |
|----------|---------------------|---------------------|
| $Va$     | -0.016**<br>(0.007) | -0.013**<br>(0.006) |
| $Va\_sq$ | 0.007***<br>(0.003) | 0.006**<br>(0.002)  |
| 控制变量     | 否                   | 是                   |
| 城市固定效应   | 是                   | 是                   |
| 时间固定效应   | 是                   | 是                   |
| 样本量      | 2232                | 2232                |
| $R^2$    | 0.038               | 0.184               |

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在1%、5%和10%的统计水平上显著;圆括号内为稳健标准误,方括号内为在10%的显著性水平上Stock-Yogo弱工具变量识别F检验的临界值。下同。

### (二)稳健性检验

(1)剔除直辖市。北京、天津、上海和重庆4个直辖市由于先天的区位和政策优势,具有一定特殊性,因此其虚拟集聚与绿色发展可能呈现出与其他地区不同的变动态势,有必要将直辖市从样本中剔除并重新进行估计,回归结果见表3第(1)列,虚拟集聚与城市绿色发展的U型关系显著成立,前文估计结果稳健。

(2)替换被解释变量。借鉴相关研究的做法(马海涛、王柯文,2022),构建城市绿色发展指标体系并采用熵值法测算城市绿色发展水平(见表4)。估计结果见表3第(2)列,虚拟集聚与城市绿色发展之间呈显著的U型关系这一估计结果稳健。

(3)考虑外生政策冲击。本文以中国实施低碳城市试点政策和智慧城市试点政策为参考,分别生成表征以上两种外生政策的虚拟变量(刘强等,2022)(若城市在当年实施以上政

策,则赋值为1,否则赋值为0),进而在基准回归模型中加入以上两种虚拟变量重新进行模型估计。根据表3(3)、(4)列回归结果可知,在考虑外生政策冲击后,虚拟集聚与城市绿色发展之间依旧呈U型关系,进一步证实研究结论的稳健性。

| 表 3               |  | 稳健性检验              |                     |                     |                     |
|-------------------|--|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 变量                |  | (1)                | (2)                 | (3)                 | (4)                 |
| <i>Va</i>         |  | -0.011*<br>(0.006) | -0.009**<br>(0.004) | -0.013**<br>(0.006) | -0.013**<br>(0.006) |
| <i>Va_sq</i>      |  | 0.005**<br>(0.002) | 0.003***<br>(0.001) | 0.006**<br>(0.002)  | 0.006**<br>(0.002)  |
| <i>Smart_city</i> |  |                    |                     | 0.006<br>(0.007)    |                     |
| <i>Low_carbon</i> |  |                    |                     |                     | 0.007<br>(0.004)    |
| 控制变量              |  | 是                  | 是                   | 是                   | 是                   |
| 城市固定效应            |  | 是                  | 是                   | 是                   | 是                   |
| 时间固定效应            |  | 是                  | 是                   | 是                   | 是                   |
| 样本量               |  | 2200               | 2232                | 2232                | 2232                |
| R <sup>2</sup>    |  | 0.161              | 0.100               | 0.185               | 0.185               |

| 表 4  |       | 绿色发展指标体系               |          |      |
|------|-------|------------------------|----------|------|
| 系统层  | 准则层   | 指标层                    | 指标含义     | 指标属性 |
| 绿色发展 | 经济绿色化 | 万元 GDP 主要耗能            | 经济节能     | -    |
|      |       | 万元 GDP 工业废水排放量         | 经济减排     | -    |
|      |       | 第三产业增加值占 GDP 比重        | 经济结构绿色化  | +    |
|      | 社会绿色化 | 人均生活天然气供应量             | 绿色消费支持   | +    |
|      |       | 人均生活用水量                | 绿色消费行为   | +    |
|      |       | 人均公园绿地面积               | 绿色公共服务供给 | +    |
|      | 环境绿色化 | 建成区绿化覆盖率               | 生态环境     | +    |
|      |       | 工业 SO <sub>2</sub> 排放量 | 污染排放     | -    |
|      |       | 污水集中处理率                | 污染治理     | -    |
|      |       |                        |          |      |

(三)内生性检验

前文基准回归中可能存在反向因果关系、遗漏变量等因素导致的内生性问题。为保证研究结论的稳健性,参照已有研究,本文选取地形起伏度作为工具变量。但由于该指标不具时变性,且对于地区经济发展而言具有负向属性,借鉴余典范等(2023)以及杨昕和赵守国

(2022)的做法,用地形起伏度的倒数与上年全国互联网上网人数的交互项作为虚拟集聚的工具变量,并对全国互联网上网人数进行了对数化处理。选取该工具变量原因在于,一方面,地形起伏度作为地形特征的重要指标,完全由经济系统以外因素决定,满足外生性假设;另一方面,地形起伏度对于地区数字基础设施建设具有重要影响,地形起伏度越小,越有利于数字基础设施建设(洪俊杰等,2024),进而有利于虚拟集聚发展,满足相关性假设。表5第(1)、(2)列报告了第一阶段的回归结果。结果显示,工具变量的一次项( $Iv$ )和二次项( $Iv\_sq$ )均显著为正,且F值均大于10。列(3)中第二阶段的回归结果显示,Anderson LM统计量显著拒绝了工具变量识别不足的原假设;Cragg-Donald Wald F统计量大于10%的Stock-Yogo临界值,满足弱工具变量的检验要求。该回归结果显示虚拟集聚的一次项系数( $Va$ )显著为负,二次项系数( $Va\_sq$ )显著为正,与基准回归结果一致。

| 表5                            | 工具变量法检验结果          |                   |                     |
|-------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|
|                               | (1)                | (2)               | (3)                 |
| $Va$                          |                    |                   | -0.010**<br>(0.043) |
| $Va\_sq$                      |                    |                   | 0.466***<br>(0.124) |
| $Iv$                          | 0.272**<br>(0.100) |                   |                     |
| $Iv\_sq$                      |                    | 0.059*<br>(0.032) |                     |
| 控制变量                          | 是                  | 是                 | 是                   |
| 城市固定效应                        | 是                  | 是                 | 是                   |
| 时间固定效应                        | 是                  | 是                 | 是                   |
| 样本量                           | 2232               | 2232              | 2232                |
| 第一阶段F值                        | 12.47              | 58.40             |                     |
| $R^2$                         | 0.200              | 0.193             | 0.153               |
| Anderson LM statistic         |                    |                   | 35.6*               |
| Cragg-Donald Wald F statistic |                    |                   | 15.50<br>[7.03]     |

(四)异质性分析

1.区域异质性

将样本划分为东部地区、中部地区和西部地区三个子样本分别进行回归。由表6(1)——(3)列回归结果可知,在东部和中部地区,虚拟集聚对城市绿色发展的影响呈现显著的U型特征,与前文基准回归结果一致,而在西部地区虽呈现U型关系,但回归结果未通过显著性检验。这可能是因为相较于东、中部地区,西部地区数字技术发展水平、数字基础设施建设相对滞后,虚拟集聚程度较低,其对城市绿色发展的促进作用还未显现。此外,计算得到东部地区U型的拐点为0.49,中部地区U型的拐点为0.91,表明在东部地区虚拟集聚会更早到达拐点右

侧,对城市绿色发展产生促进作用。这可能是由于东部地区数字发展水平更高,有利于虚拟集聚对城市绿色发展促进效应的更早释放。

2.城际联系强度异质性

城市群作为城市发展到成熟阶段最高的空间组织形式,是经济社会高质量发展的空间载体(罗能生、李建明,2018)。本文将样本城市划分为城市群<sup>①</sup>城市和非城市群城市并分别进行回归,结果如表6列(4)—(5)所示。虚拟集聚对城市群城市绿色发展呈现显著的U型影响,而对非城市群城市绿色发展的U型影响则不显著。究其原因,虚拟集聚促进城市群内部城际联系更为紧密,降低了城市间恶性竞争带来的空间负外部性,促进了城市之间资源及技术互补,有利于提高技术成果转化,推动城市绿色发展,进而使得虚拟集聚的作用效果更加明显。而对于非城市群城市而言,“各自为战”式发展使得生产要素未能达到有效配置,技术创新能力和资源利用效率不足制约了虚拟集聚的绿色赋能效应。

表6 异质性检验

|           | (1)                 | (2)                  | (3)               | (4)                 | (5)               |
|-----------|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 变量        | 东部                  | 中部                   | 西部                | 城市群城市               | 非城市群城市            |
| $Va$      | -0.037*<br>(0.022)  | -0.211***<br>(0.077) | -0.112<br>(0.071) | -0.096**<br>(0.040) | -0.076<br>(0.054) |
| $Va_{sq}$ | 0.038***<br>(0.014) | 0.115***<br>(0.038)  | 0.030<br>(0.024)  | 0.037***<br>(0.013) | 0.018<br>(0.028)  |
| 控制变量      | 是                   | 是                    | 是                 | 是                   | 是                 |
| 城市固定效应    | 是                   | 是                    | 是                 | 是                   | 是                 |
| 时间固定效应    | 是                   | 是                    | 是                 | 是                   | 是                 |
| 样本量       | 800                 | 800                  | 632               | 1416                | 816               |
| $R^2$     | 0.060               | 0.465                | 0.305             | 0.350               | 0.409             |

(五)机制检验

依据前文所述作用机理,本文对技术创新、产业结构优化和市场整合三个机制进行检验,检验结果见表7。表7第(1)列显示,机制变量技术创新( $Ina$ )的系数在1%的水平上显著为正,说明技术创新提高了城市绿色发展水平;第(2)列显示虚拟集聚的一次项( $Va$ )系数显著为负,二次项( $Va_{sq}$ )系数显著为正,表明虚拟集聚对技术创新具有U型关系的影响,这与已有的研究结论类似(王海等,2023)。结合第(1)、(2)列可知,虚拟集聚对城市绿色发展的影响可通过技术创新这一路径进行传导。

表7第(3)列中,机制变量产业结构优化( $Ind$ )的系数显著为正,表明产业结构优化对城市

①城市群城市来自国务院批复的9个国家级城市群:长江中游城市群、哈长城市群、成渝城市群、长江三角洲城市群、中原城市群、北部湾城市群、关中平原城市群、呼包鄂榆城市群、兰西城市群。



绿色发展具有正向促进作用,第(4)列中虚拟集聚的一次项( $Va$ )在1%的水平上显著为负,二次项( $Va\_sq$ )系数在5%的水平上显著为正,表明虚拟集聚对产业结构优化之间存在U型的影响关系,这与金飞和徐长乐(2022)的发现一致。虚拟集聚初期基础设施投入需要大量资本,造成第二产业比重上升,不利于经济发展向第三产业转型,而随着虚拟集聚的不断发展,数字技术与传统产业的融合进一步深入,虚拟集聚对产业结构优化的促进作用逐渐显现(金飞、徐长乐,2022)。结合第(3)、第(4)列结果可知,虚拟集聚对城市绿色发展的影响可通过产业结构优化这一路径进行传导。

最后,从表7第(5)列看,机制变量市场整合( $Mar$ )的系数在1%的水平上显著为正,表明市场一体化有利于城市绿色发展,由第(6)列结果可知,虚拟集聚与市场整合之间呈U型关系。前期,虚拟集聚所依托的数字基础设施分布不均衡,且数据交易市场主要集中在上海、广东等东部地区,导致数据要素无法实现自由流动,统一大市场建设受阻(陈伟光等,2022)。而随着数字基础设施的完善和大型数据交易市场建设的加快,数据要素可以自由流动,区域间科技信息交流更加顺畅,虚拟集聚的发展提高了市场整合程度。综合以上分析,研究假说H2得到验证。

表 7 机制检验结果

|          | (1)                 | (2)                | (3)                 | (4)                  | (5)                 | (6)                |
|----------|---------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| 变量       | $Gtfp$              | $Ina$              | $Gtfp$              | $Ind$                | $Gtfp$              | $Mar$              |
| $Va$     | -0.012**<br>(0.006) | -0.227*<br>(0.133) | -0.013**<br>(0.006) | -0.235***<br>(0.083) | -0.012*<br>(0.006)  | -1.692*<br>(0.961) |
| $Va\_sq$ | 0.006**<br>(0.002)  | 0.099*<br>(0.059)  | 0.006**<br>(0.002)  | 0.073***<br>(0.023)  | 0.005**<br>(0.002)  | 0.737**<br>(0.365) |
| $Ina$    | 0.006***<br>(0.002) |                    |                     |                      |                     |                    |
| $Ind$    |                     |                    | 0.017***<br>(0.006) |                      |                     |                    |
| $Mar$    |                     |                    |                     |                      | 0.078***<br>(0.020) |                    |
| 控制变量     | 是                   | 是                  | 是                   | 是                    | 是                   | 是                  |
| 城市固定效应   | 是                   | 是                  | 是                   | 是                    | 是                   | 是                  |
| 时间固定效应   | 是                   | 是                  | 是                   | 是                    | 是                   | 是                  |
| 样本量      | 2224                | 2232               | 2232                | 2232                 | 2232                | 2232               |
| $R^2$    | 0.191               | 0.663              | 0.188               | 0.756                | 0.192               | 0.148              |

## 六、进一步分析

### (一)虚拟集聚的边界污染治理效应

省界地区大多处于各省经济体系末梢,地方政府为发展经济通常会在省界地区对一些具有较高经济收益、“见效快”但高污染的企业做出“放水”行为,致使边界污染问题成为环境治理中的“顽疾”。在中国“条块分割”的管理体制下,环境属地管理模式使得地方环保部门仅对属地内的环境问题负责,属地管理权限的约束使其在解决“边界污染”问题上“力不从心”(龙文滨、胡珺,2018)。而虚拟集聚为边界污染治理提供了可能的新路径。为验证虚拟集聚对省界城市污染治理的作用效果,本文从样本城市中筛选出位于省边界线上或与省边界线相交的城市,并进行实证回归估计,回归结果如表8列(1)一(2)所示,无论是否加入控制变量,虚拟集聚的一次项( $Va$ )系数显著为正,二次项( $Va\_sq$ )系数不显著,表明虚拟集聚与省界城市绿色发展之间呈线性递增关系,其对省界城市的绿色发展有显著促进作用。首先,虚拟集聚不仅加快了环保技术扩散,为边界污染治理提供科技动力,也提高了污染源信息获取速度,有利于监管部门精准识别污染源,并进一步完善了区域间污染协调治理机制。深入分析发现虚拟集聚平台具有开放性、包容性等特点,可以容纳来自各地的企业,行业准入门槛显著降低,使得经济活动在地区间的边界效应明显弱化。如此,既有利于治污技术在城际间扩散,进而提高地区绿色发展效率,也为省界城市发展绿色产业提供了可能。其次,依托于数字平台的虚拟集聚可以通过广泛的网络连接、海量算力以及碎片化信息获得,对能源消耗、污染排放等环境问题实时监控,明确污染主体责任,把外部性问题量化到个体,将省界城市污染的外部成本内部化。最后,虚拟集聚促进了生产要素在不同地区间流动,削弱了地方行政垄断的作用,推动政府间关系由竞争转向合作共享,有助于省界城市与毗邻城市、内陆城市之间形成环境规制和污染联防联控的协同关系(陈芳、刘松涛,2022),为协调解决边界污染问题提供突破口。

### (二)“东数西算”背景下虚拟集聚对西部城市绿色发展的进一步研究

前文异质性分析部分表明,虚拟集聚对城市绿色发展的U型关系在西部地区尚不显著,而国家对网络基础设施建设的政策支持,为西部城市绿色发展提供了机遇。已有研究表明,网络基础设施作为虚拟集聚的底座具有绿色增长特征(黄鑫,2023),可促进区域高质量发展(张涛、李均超,2023)。因此虚拟集聚的绿色赋能效果可能会因网络基础设施水平的不同而存在差异。为探究网络基础设施在虚拟集聚对西部城市绿色发展影响中的调节作用,本文构建如下模型:

$$Gtfp_{it} = \theta_0 + \theta_1 Va_{it} + \theta_2 Va_{it}^2 + \theta_3 Va_{it} \times Infra_{it} + \theta_4 Va_{it}^2 \times Infra_{it} + \theta_5 Infra_{it} + \theta_6 \sum Control_{it} + u_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (7)$$

其中,  $Infra$  为城市网络基础设施建设水平,参考沈坤荣等(2023)的做法测得,其他变量同式(1)。已有研究证明了调节变量可影响U型关系拐点的移动。拐点  $Va^* = (-\theta_1 - \theta_3 Infra) / (2\theta_2 + 2\theta_4 Infra)$  对于  $Infra$  的偏导  $\partial Va^* / \partial Infra = (\theta_1 \theta_4 - \theta_2 \theta_3) / 2(\theta_2 + \theta_4 Infra)^2$ 。若  $\theta_1 \theta_4 - \theta_2 \theta_3 > 0$ , 拐点右移,若  $\theta_1 \theta_4 - \theta_2 \theta_3 < 0$ , 则拐点左移。

表8第(3)列报告了在西部子样本中网络基础设施建设的调节作用,结果显示  $\theta_1 \theta_4 - \theta_2 \theta_3 < 0$ , U型曲线的拐点左移,表明网络基础设施使得虚拟集聚对城市绿色发展的促进作用提前。一方面,随着网络基础设施建设水平不断提高,产业集群内主体间的关系网络更加紧密,虚拟集聚程度进一步提高,加快了虚拟集聚绿色赋能效应的到来。另一方面,网络基础设施加速了前沿环保技术在不同企业间的传播,有效减少了企业污染排放。本部分的结论有效支撑了“东数西算”工程的理论意义。“东数西算”工程在推动数据和信息要素向西部流动的同时,也促进了西部地区网络基础设施建设,减少了能源消耗。

表8 进一步分析检验结果

| 变量                                      | (1)               | (2)                | (3)                 |
|---|-------------------|--------------------|---------------------|
| $Va$                                    | 0.055*<br>(0.028) | 0.028**<br>(0.013) | -0.843*<br>(0.441)  |
| $Va\_sq$                                | -0.012<br>(0.008) | -0.007<br>(0.005)  | 0.585**<br>(0.287)  |
| $Va \times Infra$                       |                   |                    | 0.180**<br>(0.086)  |
| $Va\_sq \times Infra$                   |                   |                    | -0.121**<br>(0.057) |
| $Infra$                                 |                   |                    | -0.020<br>(0.020)   |
| 控制变量                                    | 否                 | 是                  | 是                   |
| 城市固定效应                                  | 是                 | 是                  | 是                   |
| 时间固定效应                                  | 是                 | 是                  | 是                   |
| 样本量                                     | 1840              | 1840               | 632                 |
| $R^2$                                   | 0.093             | 0.107              | 0.331               |
| $\theta_1 \theta_4 - \theta_2 \theta_3$ |                   |                    | <0                  |
| 拐点移动方向                                  |                   |                    | 左                   |

七、结论与政策建议

本文对2013—2020年中国279个地级市的虚拟集聚水平和绿色发展效率进行测度,并考察该期间虚拟集聚对中国城市绿色发展的影响以及其中可能存在的作用机制与异质性。研究表明:第一,虚拟集聚对城市绿色发展的影响存在U型曲线关系,只有在数字基础设施的节

能效应大于耗能效应后,虚拟集聚才能促进城市绿色发展;第二,虚拟集聚对城市绿色发展的影响存在地区和城际联系度上的异质性,在东、中部地区城市和城市群城市中的U型影响更为显著;第三,技术创新、产业结构优化以及市场整合是虚拟集聚影响城市绿色发展的重要路径;第四,虚拟集聚能够消除跨区域污染治理的“顽疾”,促进省界城市绿色发展;同时,网络基础设施在虚拟集聚对西部城市绿色发展的影响中具有正向调节作用,可以促进虚拟集聚绿色赋能效应提前到来。基于上述研究结论,提出如下政策建议:

第一,积极引导大数据、人工智能等数字技术与传统产业融合发展。研究结论表明只有当虚拟集聚水平越过拐点值后,其对城市绿色发展的促进作用才能显现。因此,要进一步完善顶层设计,加快数字基础设施及相关信息技术应用平台建设,减轻产业集群数字化转型负担。强化财政专项资金统筹,引导各级财政资金加大对产业集群数字化转型的投入,加强对数字化转型重大平台、重大项目及试点示范的支持,加快打造优势产业集群的虚拟集聚平台,使虚拟集聚尽早发挥对城市绿色发展的正向作用。

第二,因地制宜地制定数字经济政策,根据城市自身特点完善数字基础设施建设,充分发挥虚拟集聚对城市绿色发展的积极作用。一方面,对于东部和中部地区的城市,地方政府要积极扩大数字基础设施建设,深入推广数字技术应用,将虚拟集聚的绿色赋能效应发挥到最大。对于西部地区城市,要充分考虑其资源禀赋和产业发展现状,合理有效地推动数字技术应用。同时,要持续推进“东数西算”工程,促进东部地区互联网、大数据、人工智能等企业产业链环节向西部地区延伸,推动西部地区产业集群数字化转型,发挥虚拟集聚对绿色发展的促进作用。另一方面,城市群城市要继续完善内部数字网络布局,加强“数实融合”,加快推动产业集群线上转型,充分发挥虚拟集聚在城市绿色发展中的“头雁效应”。

第三,探索城市绿色发展的多维驱动路径,增强技术创新、产业结构优化以及市场整合对城市绿色发展的传导作用。机制检验表明,虚拟集聚可以通过技术创新、产业结构优化和市场整合作用于城市绿色发展,因此要增强科技创新驱动力,加大科技研发资金与高水平科技人才投入,在降碳减排、污染防治等领域给予研发补贴,统筹布局5G、物联网、数据中心等信息基础设施建设,夯实虚拟集聚促进城市绿色发展的数字底座;落实好“数字中国”政策,大力推进大数据、互联网、人工智能与传统产业深度融合,利用数字技术推动传统产业转型升级,提高传统产业能源利用效率,降低污染排放;加快全国统一大市场建设,逐步消除有碍市场公平竞争的政策制度,破除市场准入壁垒,同时要推动区域数字经济协调发展,消弭地区间数字鸿沟,强化虚拟集聚对区域环境污染的联防联控作用。

第四,对于省界地区城市要加大数字基础设施的资金投入,科学布局网络基础设施,合理有序推进产业虚拟集聚。要积极利用网络平台,因地制宜地发展绿色产业,合理引入低能耗、低污染企业,在推动经济增长的同时兼顾绿色高质量发展。同时,要积极引入和培养数字技



术人才、智能化人才,不断强化数字技术运用能力建设,为虚拟集聚赋能城市绿色发展提供持续动力。

## 参考文献:

- [1] 白丽飞. 数字经济的碳减排效应研究——兼论财政政策和市场机制的叠加作用[J]. 甘肃社会科学, 2023(06):224-236.
- [2] 陈晓红,胡东滨,曹文治. 数字技术助推我国能源行业碳中和目标实现的路径探析[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(09):1019-1029.
- [3] 陈建军,胡晨光. 产业集聚的集聚效应——以长江三角洲次区域为例的理论和实证分析[J]. 管理世界, 2008, 177(06):68-83.
- [4] 陈芳,曹晓芸. 长三角差异化工业碳达峰路径研究[J]. 苏州大学学报(哲学社会科学版), 2022, 43(04):41-51.
- [5] 陈芳. 非合意产出约束下长江经济带能源效率评价与影响因素研究——基于非径向方向性距离函数估算[J]. 安徽大学学报(哲学社会科学版), 2016, 40(06):138-147.
- [6] 陈小勇. 产业集群的虚拟转型[J]. 中国工业经济, 2017, 357(12):78-94.
- [7] 陈伟光,裴丹,钟列炆. 数字经济助推全国统一大市场建设的理论逻辑、治理难题与应对策略[J]. 改革, 2022(12):44-56.
- [8] 陈芳,刘松涛. 官员异地交流提升了长江经济带绿色发展水平吗?——基于多期双重差分模型的实证考察[J]. 安徽大学学报(哲学社会科学版), 2022, 46(04):138-146.
- [9] 段霞,张蔷薇. 产业数字化、虚拟集聚与全要素生产率[J]. 西北师大学报(社会科学版), 2023, 60(01):135-144.
- [10] 郭丰,杨上广,任毅. 数字经济、绿色技术创新与碳排放——来自中国城市层面的经验证据[J]. 陕西师范大学学报(哲学社会科学版), 2022, 51(03):45-60.
- [11] 郭爱君,张传兵. 数字经济如何影响碳排放强度?——基于产业结构高级化与合理化的双重视角[J]. 科学学与科学技术管理, 2023(11):1-28.
- [12] 胡求光,周宇飞. 开发区产业集聚的环境效应:加剧污染还是促进治理?[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10):64-72.
- [13] 黄鑫. 互联网基础设施建设加速了能源低碳化转型吗?——来自“宽带中国”战略的经验证据[J]. 环境经济研究, 2023, 8(02):21-41.
- [14] 黄庆华,时培豪,胡江峰. 产业集聚与经济高质量发展:长江经济带107个地级市例证[J]. 改革, 2020(01):87-99.
- [15] 洪俊杰,李研,杨曦. 数字经济与收入差距:数字经济核心产业的视角[J]. 经济研究, 2024, 59(05):116-131.
- [16] 韩晶,姜如玥. 数字经济赋能低碳发展:理论逻辑与实践路径[J]. 统计研究, 2024, 41(04):54-67.
- [17] 及添正,邓宏兵,张天铃. 生产性服务业集聚对碳排放效率的影响——基于长江经济带108个城市企业数据的分析[J]. 资源科学, 2023, 45(01):31-47.
- [18] 金飞,徐长乐. 数字经济发展对碳排放的非线性影响研究[J]. 现代经济探讨, 2022(11):14-23.
- [19] 林伯强,谭睿鹏. 中国经济集聚与绿色经济效率[J]. 经济研究, 2019, 54(02):119-132.
- [20] 李伟娜,杨永福,王珍珍. 制造业集聚、大气污染与节能减排[J]. 经济管理, 2010, 32(09):36-44.
- [21] 李勇刚,张鹏. 产业集聚加剧了中国的环境污染吗——来自中国省级层面的经验证据[J]. 华中科技大

学学报(社会科学版),2013,27(05):97-106.

[22] 吕有金,高波,孔令池. 国内市场整合与绿色全要素生产率——非线性关系及门槛效应检验[J]. 经济问题探索,2021(08):19-30.

[23] 刘强,马彦瑞,徐生霞. 数字经济发展是否提高了中国绿色经济效率?[J]. 中国人口·资源与环境,2022,32(03):72-85.

[24] 刘禹圻,孙铁山. 产业集聚对雾霾污染影响的溢出效应——基于城市网络的视角[J]. 城市发展研究,2024,31(05):8-13.

[25] 刘耀彬,邓伟凤,李硕硕. 数字产业集聚对减污降碳协同的影响——以长江经济带为例[J]. 资源科学,2024,46(04):744-760.

[26] 刘烨,王琦,班元浩. 虚拟集聚、知识结构与中国城市创新[J]. 财贸经济,2023,44(04):89-105.

[27] 罗军. 数字化如何赋能制造业绿色发展[J]. 当代财经,2023(07):108-120.

[28] 罗能生,李建明. 产业集聚及交通联系加剧了雾霾空间溢出效应吗?——基于产业空间布局视角的分析[J]. 产业经济研究,2018(04):52-64.

[29] 廖小菲,申雨瑶. 数字经济对中国城市低碳转型的影响机理及效应[J]. 经济地理,2024,44(06):31-41.

[30] 梁雅楠,张成. 人口老龄化、数字经济与我国产业结构优化[J]. 经济问题探索,2022(12):114-131.

[31] 龙文滨,胡珺. 节能减排规划、环保考核与边界污染[J]. 财贸经济,2018,39(12):126-141.

[32] 毛其淋,盛斌. 对外经济开放、区域市场整合与全要素生产率[J]. 经济学(季刊),2012,11(01):181-210.

[33] 马海涛,王柯文. 城市技术创新与合作对绿色发展的影响研究——以长江经济带三大城市群为例[J]. 地理研究,2022,41(12):3287-3304.

[34] 庞瑞芝,王宏鸣. 数字经济与城市绿色发展:赋能还是负能?[J]. 科学学研究,2023,42(07):1398-1408.

[35] 任晓松,刘宇佳,赵国浩. 经济集聚对碳排放强度的影响及传导机制[J]. 中国人口·资源与环境,2020,30(04):95-106.

[36] 孙鹏博,葛力铭,杨晨. 生产性服务业和工业空间协同集聚对中国工业碳排放的影响[J]. 环境经济研究,2023,8(01):1-28.

[37] 史丹. 数字经济条件下产业发展趋势的演变[J]. 中国工业经济,2022,416(11):26-42.

[38] 沈坤荣,林剑威,傅元海. 网络基础设施建设、信息可得性与企业创新边界[J]. 中国工业经济,2023,(01):57-75.

[39] 田霖,张仕杰. 我国虚拟集聚水平测度、空间差异与收敛性研究[J]. 浙江大学学报(人文社会科学版),2023,53(07):75-97.

[40] 谭洪波,夏杰长. 数字贸易重塑产业集聚理论与模式——从地理集聚到线上集聚[J]. 财经问题研究,2022,463(06):43-52.

[41] 佟家栋,张千. 中国式现代化建设与数字中国[J]. 南开学报(哲学社会科学版),2023(03):22-31.

[42] 王海,沈盈盈,李言. 数字经济发展与地区绿色创新:负担还是赋能?[J]. 现代财经(天津财经大学学报),2023,43(05):34-49.

[43] 王昀,孙款款. 国内产品市场从分割走向整合了吗——来自中国城市层面的经验证据[J]. 经济学家,2023,291(03):98-108.

[44] 王如玉,梁琦,李广乾. 虚拟集聚:新一代信息技术与实体经济深度融合的空间组织新形态[J]. 管理世界,2018,34(02):13-21.

[45] 杨德明,毕建琴. “互联网+”、企业家对外投资与公司估值[J]. 中国工业经济,2019(06):136-153.

[46] 杨刚强,王海森,范恒山,等. 数字经济的碳减排效应:理论分析与经验证据[J]. 中国工业经济,2023,

(05):80-98.

[47] 杨昕,赵守国.数字经济赋能区域绿色发展的低碳减排效应[J].经济与管理研究,2022,43(12):85-100.

[48] 余典范,龙睿,王超.数字经济与边界地区污染治理[J].经济研究,2023,58(11):172-189.

[49] 朱东波,李红.中国产业集聚的环境效应及其作用机制[J].中国人口·资源与环境,2021,31(12):62-70.

[50] 周鹏飞,沈洋,李爱民.农旅融合能促进农业高质量发展吗?——基于省域面板数据的实证检验[J].宏观经济研究,2021(10):117-130.

[51] 张可,豆建民.集聚对环境污染的作用机制研究[J].中国人口科学,2013,158(05):105-116+128.

[52] 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(04):113-135.

[53] 张英浩,汪明峰,崔璐明.数字经济水平对中国市域绿色全要素生产率的影响[J].经济地理,2022,42(09):33-42.

[54] 赵放,李文婷,马婉莹.数字经济视域下地理集聚与虚拟集聚的演化特征及耦合关系[J].吉林大学社会科学学报,2024,64(01):117-32+238.

[55] 张青,茹少峰.新型数字基础设施促进现代服务业虚拟集聚的路径研究[J].经济问题探索,2021(07):123-135.

[56] 翟琮,朱培伟,任仁.环境规制、生产性服务业集聚与城市绿色创新[J].宏观经济研究,2022(12):98-114.

[57] Ben, B., L. Taleb, Y. Ben-Zaied. Does ICT Change the Relationship between Total Factor Productivity and CO<sub>2</sub> Emissions? Evidence Based on a Nonlinear Model[J]. Energy Economics, 2021, 101(9): 105406.

[58] Dong, F., M. Hu, Y. Gao, et al. How Does Digital Economy Affect Carbon Emissions? Evidence from Global 60 Countries[J]. Science of the Total Environment, 2022, 852: 158401.

[59] Fujita, M., H. Ogawa. Multiple Equilibria and Structural Transition of Non-monocentric Urban Configurations[J]. Regional Science and Urban Economics, 1982, 12(2): 161-96.

[60] Li, Z., J. Wang. The Dynamic Impact of Digital Economy on Carbon Emission Reduction: Evidence City-Level Empirical Data in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 351: 131570.

[61] Lucas, R. E., E. Rossi-Hansberg. On the Internal Structure of Cities[J]. Econometrica, 2002, 70(4): 1445-1476.

[62] Molina, A., C. F. Bremer, W. Evershrim. Achieving Critical Mass: A Global Research Network in Systems Engineering[J]. Foresight, 2001, 3(1): 59-65.

[63] Nguyen, T. T., T. A. T. Pham, H. T. X. Tram. Role of Information and Communication Technologies and Innovation in Driving Carbon Emissions and Economic Growth in Selected G-20 Countries[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 261: 110-162.

[64] Ren, W., Y. Zhong, J. Meligrana, et al. Urbanization, Land Use, and Water Quality in Shanghai: 1947-1996[J]. Environment International, 2003, 29(5): 649-659.

[65] Virkanen, J. Effect of Urbanization on Metal Deposition in the Bay of Southern Finland[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 39(9): 729-738.

[66] Wu, L., X. Wan, A. Jahanger, et al. Does the Digital Economy Reduce Air Pollution in China? A Perspective from Industrial Agglomeration[J]. Energy Reports, 2023, 9: 3625-3641.

[67] Zeng, D. Z., L. Zhao. Pollution Havens and Industrial Agglomeration[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 2009, 58(2): 141-153.

# Can Virtual Agglomeration Promote Urban Green Development?

Cheng Fang, Wang Xiyu

(School of Economics, Anhui University)

**Abstract:** As a new form of industrial organization incubated by the digital economy, it is worth paying attention to whether virtual agglomeration can become a new engine for green development in urban spatial dimensions. This article is based on panel data from 279 cities in China from 2013 to 2020, using the location entropy method and geographic distance spillover attenuation index to measure the level of virtual agglomeration, and systematically examines the environmental effects of virtual agglomeration at the urban level. Research shows that the impact of virtual agglomeration on urban green development exhibits a U-shaped relationship of first inhibition and then promotion, and this conclusion remains robust after a series of tests. Technological innovation, industrial structure optimization, and market integration are its influencing paths. Further analysis reveals that virtual agglomeration has a stronger promoting effect on the green development of cities in the eastern and central regions, as well as urban agglomerations. In addition, virtual agglomeration effectively reduces environmental pollution in provincial boundary cities, becoming a breakthrough point in breaking boundary pollution. Therefore, this article suggests accelerating core digital technology innovation and focusing on promoting the digital transformation of industrial clusters, and utilizing digital technology to promote industrial structure optimization and break down barriers to market integration. At the same time, we also recommend that digital infrastructure be deployed according to local conditions, strengthen network infrastructure construction, and foster new momentum for green development.

**Keywords:** Virtual Agglomeration; Green Total Factor Productivity; Boundary Pollution; East-West Computing Resource Transfer

**JEL Classification:** Q51, Q53

(责任编辑:朱静静)