

数字经济发展对产业结构升级的影响

——基于灰关联熵与耗散结构理论的研究

陈晓东 杨晓霞

摘要:近年来,数字经济蓬勃发展,成为我国经济高质量发展的助推器。随着我国全面进入数字经济时代,产业结构数字化升级趋势日益明显。基于灰关联熵与耗散结构理论研究发现,数字经济对我国产业结构升级的影响具有明显的阶段性特征;2013年以来,数字经济已经成为我国产业结构持续升级的动力源泉。通过对比数字产业化和产业数字化对产业结构升级的影响发现,数字产业化是促进产业结构升级的基础性和先导性条件;但是,产业数字化促进产业结构升级的效应更为显著。数字经济是未来引领产业结构升级的新动能,我国要加快推进新型数字基础设施建设,通过数字产业化的战略布局、空间优化以及产业数字化的加速转型等措施促进产业结构升级,实现我国经济更高质量、更有效率、更为安全的发展,加快建立现代产业体系,推动经济体系的优化升级。

关键词:数字产业化;产业数字化;产业结构升级;灰关联熵;耗散结构理论

中图分类号:F121.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7543(2021)03-0026-14

产业结构升级是我国经济高质量发展的内在动力,是建设现代化经济体系的重要内容。在产业结构升级的历史进程中,科技革命一直扮演着决定性的角色。蒸汽科技革命、电力科技革命推动了产业结构由农业主导型向轻工业主导型、重工业主导型的依次演进。当前,以“大智移云网”为代表的新一代信息技术的创新突破使数字经济成为当今社会的主流经济形态。在数字经济浪潮下,数字产业异军突起并成为我国国民经济重要产业;工业互联网重塑了工业生产流程体系,推动着商业模式持续创新和新一轮产业革命加速演进。在我国抗击新冠肺炎疫情过程中,传统产业生存艰难,而数字经济则呈现爆发式增

长,倒逼传统产业数字化转型全面提速。数字经济已成为我国经济增长的稳定器和产业结构升级的助推器。当前,我国正处于经济结构转型升级的关键时期,研究数字经济与产业结构升级之间的关系可以解释我国产业结构在调整过程中出现的新现象和新问题,并进一步探索产业结构升级的新方向和新路径,助力我国经济实现更高质量的快速发展。

虽然我们能够通过经济运行的实践较为直观地感受到数字经济所带来的产业结构升级效应,但是从定量角度实证检验数字经济与产业结构升级的文献并不丰富。产业结构升级本质是产业体系中相对较为高级的产业逐渐成为主导产

基金项目:国家社会科学基金重大研究专项“加快构建中国特色哲学社会科学学科体系学术体系话语体系”(18VXK002);国家社会科学基金项目“新经济发展与中国产业动能转换的路径选择与机制研究”(19BJY093);中国社会科学院登峰战略优势学科(产业经济学)研究项目;中国社会科学院京津冀协同发展智库基础研究项目“电子信息产业链供应链安全状况评估研究”(2020G04)。

作者简介:陈晓东,中国社会科学院工业经济研究所研究员,郑州大学商学院博士生导师,北京大学国家竞争力研究院特聘研究员;杨晓霞,郑州大学商学院博士研究生。

业的过程,其方向是高技术化和高集约化。由于现实经济活动的连续性,产业结构中各产业之间以及产业内各构成部分之间不是绝对割裂而是存在着复杂而密切的内在联系,产业结构升级也就类似于生态系统的流变与演替^[1],是一个复杂的系统演化过程,需要以系统论的思想为指导进行科学分析。为分析数字经济与产业结构升级之间的关系,本文将产业结构升级视为系统演化过程,从理论上分析数字经济影响产业结构升级的内在机理与基本路径,并运用系统论方法实证检验数字经济对产业结构升级的影响效应,在此基础上提出发展数字经济促进我国产业结构升级的思路和政策建议。

一、相关文献综述

在人类社会发展历程中,科技革命与产业革命总是相伴相生。由于科技成果的产业化、市场化应用,新产业不断涌现,传统产业持续升级,产业结构格局被不断重塑^[2]。当今世界新一轮科技革命和产业革命方兴未艾,产业结构加速演进并呈现新的特征。

(一)关于数字经济的相关研究

20世纪90年代,美国“国家信息基础设施建设计划”的实施开启了全球数字经济发展的新纪元。1996年,唐·泰普斯科特(Don Tapscott)在其著作《数字经济:网络智能时代的希望与危机》中首次将以数字方式呈现信息流的经济模式定义为“数字经济”^[3]。随后,尼古拉斯·尼葛洛庞帝(Nicholas Negroponte)在《数字化生存》一书中预言,数字经济将带来生产力、生产关系以及经济活动的全面渗透和变革^[4]。自1998年起,美国商务部连续7年发布《新兴的数字经济》系列年度报告,在全球范围内引发了对数字经济的高度关注^[5],世界各国纷纷将数字经济作为新一轮角逐的焦点。

随着数字经济与经济社会各领域融合不断加深,一些学者和机构从不同视角定义数字经

济。Mesenbourg将数字经济等同于电子商务^[6]; Danny Quah将数字经济的范畴扩展至利用互联网进行商品及服务交易的所有经济活动^[7];康铁祥认为数字经济是由数字化的虚拟商品所构成的一种经济形态^[8]。2016年,G20杭州峰会达成了关于数字经济的共识,即数字经济是指以使用数字化的知识和信息为关键生产要素、以现代信息网络为重要载体、以信息通信技术(ICT)的有效使用为效率提升和经济结构优化的重要推动力的一系列经济活动^[9]。根据数字经济活动的具体形态,中国信息通信研究院将数字经济分为数字产业化和产业数字化两大类,并建立了数字经济的核算体系和方法。

作为一种新型经济形态,数字经济是颠覆性创新的应用^[10],基于互联网平台进行资源配置是其最本质特征^[11]。互联网平台的存在使市场结构逐渐趋近于完全竞争的市场,改变了传统工业经济中的盈利模式,为传统经济的转型提供了路径^[12]。市场机制的完善、经济绩效的提升和创新资源的积累则是数字经济推动经济实现高质量发展的重要逻辑^[13]。

(二)关于数字经济与产业结构之间关系的研究

数字经济与产业结构之间的关系一直是学者们较为关注的话题,早期研究大多分别从数字产业化或者产业数字化的角度来研究。然而,随着数字经济与实体经济的不断融合发展,从数字产业化和产业数字化两个方面综合研究二者之间关系的文献逐渐丰富。

从单一研究视角来看,一方面,数字产业化通过信息通信产业发展带动产业结构升级。Heo & Lee指出,信息通信产业与其他产业之间的联动效应、溢出效应以及扩散效应推动着产业结构升级^[14]。基于投入产出法测算发现,信息通信产业具有较强的感应度和带动度^[15],并已经成为国民经济主导产业,对产业结构优化具有关键作用^[16]。然而,信息通信产业促进产业结构升级效应与经

济发展程度呈现同方向变动关系^[17]。郭美晨的研究进一步证明了现阶段信息通信产业对我国产业结构升级的促进作用还较为有限^[18]。另一方面,产业数字化通过传统产业技术升级和效率提升促进产业结构升级。Sungjoo Lee等人基于产业关联的研究认为信息化是产业结构软化和升级的催化剂^[19],信息化能够推动制造业向高新技术产业转型升级^[20],使知识和技术密集型产业逐渐成为主导产业^[21],最终实现产业结构高级化。基于价值维度的研究认为,产业数字化不仅提高了商品使用价值效率^[22],而且提升了产业生产效率,并最终赋能产业结构转型升级^[23]。

从综合研究视角来看,数字经济是一种新动能,能够推动以劳动密集型、重工业为主的产业结构向以技术含量高、环境友好型为主的产业结构转移^[24],是我国产业结构向中高端迈进的重要驱动力^[25]。相较于农业和服务业,制造业是数字经济的主战场,数字经济能够破解制造业转型升级中的“痛点”问题^[26],助推中小制造企业实现价值链的攀升,并最终摆脱“低端锁定”困境^[27]。基于熵值法的实证研究发现,数字经济创新科研的正外部性和扩散性能够显著推动传统制造业向智能化、技术密集型方向转型升级^[28]。

(三)相关文献评述

通过对已有研究文献的梳理可以发现:从综合视角研究数字经济与产业结构之间关系的文献不够丰富,且其中以理论分析居多,实证研究较显缺失;运用系统论的方法研究数字经济与产业结构的文献相对稀缺,且已有的研究结果未能反映数字经济影响下我国产业结构升级的历程;在我国产业结构升级的过程中,数字产业化与产业数字化对产业结构升级的作用是否相同?已有的文献对此没有给出答案,而这个问题恰恰又是现阶段完善政策的重要依据。

本文的贡献在于:从数字产业化和产业数字化两个方面实证检验数字经济对产业结构的影响,所得出的结论更为全面且对现实更具解释

力;运用灰关联熵与耗散结构理论相结合的实证方法,不仅能够检验数字经济对产业结构的影响效应,而且能够详细考察数字经济影响下产业结构的升级历程;通过灰关联熵变动原因追溯分析,得出数字产业化、产业数字化对产业结构升级影响的差异性,为制定差异化、更加精准的政策提供理论参考。

二、数字经济促进产业结构升级的内在机理与基本路径

数字经济萌芽于20世纪90年代的工业经济之中,是当时社会背景下信息技术快速发展的经济映射。相较于工业经济,数字经济打破了工业经济范式中的瓶颈和陷阱,具有三元空间经济、“三只手”经济以及生态经济等新特征,这些新特征中蕴含着数字经济驱动产业结构升级的内在机理。

(一)数字经济的新特征

第一,三元空间经济。与蒸汽技术和电力技术相比,信息技术领域的摩尔定律决定了数字技术不仅更新速度快,而且具有颠覆性创新的特性。由云、网、端所构建的虚拟数字空间改变了几千年来人类社会高度依赖实体物理空间的生存模式,开创了网络化生存的新时代。虚拟数字空间、实体物理空间与人类社会空间高度融合发展,且虚拟数字空间的经济活动逐渐占据主导和支配地位,而流动于数字空间的数据则取代土地、劳动、资本等传统生产要素,成为数字经济时代最重要的生产要素。

第二,“三只手”经济。数字经济是基于互联网的经济活动,根据梅特卡夫法则可知,一个网络的价值取决于该网络内的用户数量,用户数量越多,网络的价值越大。由于互联网外部效应的存在,基于互联网的平台组织可汇集特定领域的海量信息,通过平台对供需信息进行精准匹配,有效解决了信息不对称引致的供需结构性矛盾,降低了交易成本,使得供给和需求形成功

态平衡成为可能。数字经济范式下,平台组织这只“看得见的手”正逐渐发挥着资源配置的重要作用,并成为继市场、政府之后又一新的资源配置方式。

第三,生态经济。随着人人互联的消费互联网走向成熟,万物互联的工业互联网正在成为数字经济的主要内容。工业互联网通过全要素、全产业链、全价值链的全面连接实现了产业的网络化、数字化、智能化、协同化发展,是未来产业发展的基石。领军企业基于工业互联网打造以自身为核心的生态系统,通过共建共享机制吸引关联企业融入生态系统,从而提升核心竞争力。基于工业互联网的生态系统之间的竞争是未来竞争的主流模式,对于企业而言,构建生态抑或融入生态,成为企业战略决策无法回避的问题。

(二)数字经济促进产业结构升级的内在机理

世界产业结构升级的内在逻辑表明,技术进步是产业结构升级的内在驱动力,每一次技术进步都会带来经济范式的转变。在新的经济范式下,新兴技术产业往往会超越传统产业而逐渐成为产业体系中的主导产业,并通过产业关联、技术扩散等效应带动传统产业的转型升级,从而使产业结构向更高水平升级。工业经济时代,土地、劳动、资本等生产要素的优化组合推动着产业结构的迭代升级。随着边际报酬递减规律的出现,传统生产要素的增长能力已经日渐乏力,瓶颈约束日益凸显。而由新一代信息技术所创造的数字经济将数据作为最重要的生产要素,数据的高效清洁、低成本、可复制以及海量获取等特点克服了传统生产要素的固有缺陷,且具有“高乘数”效应。数字基础设施的建设和无形资产的投资虽然前期的固定投资成本较高,但一旦成功,边际使用成本较低甚至无限趋向于零。这不仅打破了工业经济时代边际报酬递减的陷阱,而且促进了价值创造能力的持续提升。因此,数字经济是一种绿色、创新、可持续的高质量经济范式,是能够引

领产业结构升级的新动能。基于以上分析,提出如下假设:

H1:数字经济作为经济发展的新动能,能够促进产业结构升级。

(三)数字经济影响产业结构的基本路径

数字经济通过数字产业化和产业数字化刺激新兴产业发展、改造传统产业,不断重塑产业结构的基本形态,进而推动产业结构升级。

1.数字产业化孕育新产业,数字产业的比重显著提高

一方面,数字技术通过产业化发展成为新的产业。根据技术生命周期理论可知,一项技术从无到有、从萌芽到退出历史舞台大致会经历创新期、成长期、成熟期和衰退期四个阶段,在创新期和成长期时由于技术尚未成型、成本较高、市场需求较小,难以进行大规模的生产。而当技术进入成熟期之后,技术已经稳定,成本持续下降、市场需求扩张以及广阔的发展前景将吸引大量企业进行投资和生产,当产量达到一定规模之后,新产业就会形成。经过近30年的发展,电子信息制造业、软件产业、信息服务业等产业已较为成熟,物联网产业、大数据产业、云计算产业、人工智能产业正在强势崛起并引领数字经济的发展潮流。

另一方面,数字技术催生新的商业模式,新商业模式形成新的产业。传统商业模式以企业价值创造为中心,而新一代信息技术所推动的商业模式是以客户价值创造为中心、基于互联网而创新的信息匹配模式^[29],缓解了由于信息不对称所带来的资源配置效率低下、社会福利无谓损失等顽疾,增加了商业利润,激发了商业活力。因此,数字技术所催生的新商业模式能够被快速复制、广泛应用,并发展成为一种新的产业形态。其中,电子商务、共享经济已成为新商业模式的典型代表。在此次新冠肺炎疫情中,崭露头角的“共享员工”模式更是将共享经济从共享“物”的阶段推向共享“人”的阶段,呈现强大生命力。

2.产业数字化的改造,使得传统产业的数字化水平加速提升

第一,产业数字化开启了可感知的智能生产模式。产业数字化是“软件定义、数据驱动”的数字化生产方式,使生产工艺和生产工具越来越具备人类智慧。在生产工艺方面,基于数字技术与工业软件的增材制造技术通过逐层打印方式突破了传统减材制造技术无法生产复杂结构部件的约束。继增材制造技术之后,能够模拟人类铁匠技能和创造力的“变形制造”开启了“第三次数字制造浪潮”,在降低材料浪费的同时优化了金属性能,成为未来高质量的智能化生产方式。在生产工具方面,工业机器人的广泛应用替代了大量重复性的人类劳动,工业机器人甚至逐渐具备自我感知、判断和决策能力,“黑灯工厂”“灯塔工厂”成为未来智能生产的代名词。

第二,产业数字化塑造了可视化的产业组织模式。作为数字技术“赋能”传统产业的平台和载体,工业互联网实现了生产者联网、消费者联网、供应商联网、设备联网和产品联网,搭建了人、机、物对话的框架,成为信息的“汇集池”和资源的“匹配器”。工业经济中“黑匣子”式的串行链式组织正在被更为透明的并行网络式组织所取代,每一个参与主体不仅能够了解与自己有直接业务关系的合作者,而且能够清晰地辨识与其存在间接关系的各类主体,同时实时监控物理设备运行状况,从而作出精准的战略决策。

通过以上分析可知,数字产业化与产业数字化是数字经济影响产业结构升级的两条基本路径。虽然我国已建立起门类齐全、规模庞大的工业体系,但是我国产业整体数字化水平较低,少数产业还处于工业 1.0 时代,大部分产业处于工业 2.0 和工业 3.0 时代,只有极少数产业进入工业 4.0 时代。超大规模的传统产业迫切需要数字技术赋能,传统产业的数字化升级将会极大地改变我国当前产业结构。据此,提出如下假设:

H2: 数字产业化与产业数字化都是产业结

构升级的源泉,但是,产业数字化对我国产业结构升级的意义更为重大。

三、实证分析与检验

数字经济促进产业结构升级的内在机理和基本路径已经较为清晰,但数字经济与我国产业结构升级之间的具体关系还需进一步的实证检验。

(一)模型的选择

本文从系统论视角出发,选择系统论中灰关联熵模型进行实证检验,并利用耗散结构理论中的“熵变”原理进行判定。

1.灰关联熵模型

灰关联熵模型是在灰色关联分析的基础上引入“熵”的概念,通过在灰色关联系数的基础上计算灰关联熵,以灰关联熵的变化作为判定系统演化的依据,灰关联熵的计算方法如公式(1)所示^[30]:

$$S(x) = -\sum_{j=1}^n P_j \cdot \ln P_j \quad (1)$$

其中, S 表示系统的灰关联熵, P_j 表示灰色关联系数的分布密度值。灰关联熵分析方法克服了灰色关联分析过程中由于局部关联倾向而导致的个性信息损失的缺陷,同时又发挥了灰色关联分析对样本数据要求比较宽松的优势,是衡量系统演化的有效工具。因此,本文采用灰关联熵模型进行实证检验。

2.耗散结构理论

耗散结构理论是由伊·普里戈金所提出的关于非线性开放系统演变规律的科学理论^[31]。对于具有耗散结构特征的开放系统,可以通过计算系统的“总熵变”来衡量其发展状态,系统的“总熵变”来自系统自身所产生的熵流 d_s ($d_s > 0$)以及系统与外界交换而形成的熵流 d_e ($d_e < 0$),可用公式(2)表示:

$$ds = d_s + d_e \quad (2)$$

当总熵变 $ds < 0$ 时,系统将产生自组织现象,从低级阶段向高级阶段逐渐演化;当总熵变 $ds >$

0 时,系统将处于无序的变动状态,从高级阶段向低级阶段退化;当总熵变 $ds=0$ 时,则说明系统并未发生改变。

3.灰关联熵模型及耗散结构理论对产业结构分析的适用性

产业结构是一个类似于生态系统的流变与演替系统,其过程不可逆,且具有耗散结构的典型特征。

一是产业结构的开放性。产业结构只是复杂经济体系中的一个组成部分,与经济体系中的其他系统之间存在着紧密的资金、技术、信息以及人才等要素的交流与互换。

二是产业结构的非平衡性。产业结构不是静止不变的,而是一个非平衡演化系统。科技革命带来了产业变革,产业结构远离原来的平衡态逐渐进行调整,随着新技术的成熟和稳定,新的产业格局最终形成,产业结构进入新的平衡态。

三是产业结构的非线性。产业结构是对复杂的现实经济活动所进行的抽象化分类,其中包含着纷繁复杂的产业类别。任何一个产业的发展都会受到其他产业的影响,同时也会得益于其他产业相关技术进步所带来的产业创新。因此,产

业之间以及产业内部存在着既相互竞争又相互促进的错综复杂的关联网络,并非简单的线性关系能够描述和刻画^[32]。

因此,产业结构是一个具有耗散结构特征的系统,可以利用灰关联熵模型和耗散结构理论实证检验数字经济与产业结构之间的关系。

(二) 指标选择与数据来源

在利用灰关联熵模型实证检验之前,需要确定反映数字经济发展以及产业结构升级的相关指标及数据。

1. 数字经济的发展指标

本文从数字产业化与产业数字化两个方面衡量我国数字经济的发展,由于 2002 年是我国以电子商务为代表的消费互联网扬帆起航的转折年,也是我国以需求侧为着力点的数字经济开始步入快速发展的时期。因而,本文选择 2002—2019 年的数据展开实证检验。数字经济发展指标及其规模如表 1 所示。

2. 产业结构的评价指标

本文采用产业结构高级化水平作为产业结构的评价指标,计算方法如公式(3)所示^[33]。其中, W_1 、 W_2 、 W_3 分别代表第一、二、三产业占 GDP 的比重。

表 1 数字经济发展指标及其规模(万亿元)

年份	数字经济		年份	数字经济	
	数字产业化	产业数字化		数字产业化	产业数字化
2002	0.60	0.60	2011	3.00	6.50
2003	0.67	0.83	2012	3.39	7.91
2004	1.13	0.87	2013	3.82	9.68
2005	1.30	1.30	2014	4.20	12.00
2006	1.67	1.43	2015	4.80	13.80
2007	1.46	2.44	2016	5.20	17.40
2008	2.00	2.80	2017	6.20	21.00
2009	2.02	4.18	2018	6.40	24.90
2010	2.30	5.40	2019	7.10	28.80

数据来源:中国信息通信研究院 2015 年《中国信息经济研究报告》;2016 年《中国信息经济发展白皮书》;2017 年、2020 年《中国数字经济发展白皮书》;2018 年、2019 年《中国数字经济发展与就业白皮书》;同时根据 2003—2020 年《中国统计年鉴》以及工业和信息化部统计资料、统计数据汇总整理得出

$$IS = 1*W_1 + 2*W_2 + 3*W_3 \quad (3)$$

由表 2 可知,自 2002 年起,我国产业结构的高级化水平均大于 2.2,且持续稳步增加,产业结构呈现日益高级化的趋势,表明我国进行工业化建设的成果较为显著。2015 年,我国产业结构的高级化水平跨越 2.4 的界限,并于 2019 年达到 2.468,产业结构由工业经济型向服务经济型演化的趋势愈加明显。

图 1 显示了 2002—2019 年我国产业结构高级化水平、数字产业化以及产业数字化的变动趋势。从中可以看出:第一,2002—2019 年,我国数字产业化规模和产业数字化规模均呈现上升

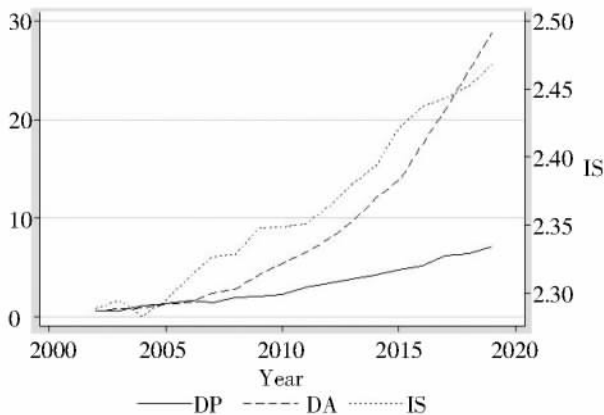


图 1 2002—2019 年我国产业结构高级化水平与数字产业化、产业数字化之间的变化趋势

注:图中 DP 表示数字产业化,DA 表示产业数字化,IS 表示产业结构高级化水平

趋势,与此同时,产业结构的高级化水平在波动中逐渐攀升。第二,数字经济内部结构发生了相对较大变动,产业数字化已成为数字经济中最主要的组成部分。第三,相较而言,产业数字化的变动趋势与产业结构高级化的变动趋势具有更为一致的相似性。

(三)模型的构建及实证检验过程

第一,确定参考序列和比较序列。在本文中,产业结构的高级化水平为参考序列 X_0 ;而数字产业化规模和产业数字化规模为比较序列 $X_i, i=1,2$ 。

第二,对数据进行无量纲化处理。均值化的数据处理方法不仅可以消除量纲和数量级的影响,而且能够保留数据原有的差异性。因此,本文采用均值化的数据处理方法对参考序列和比较序列进行无量纲化处理,处理方法如下:

$$\bar{X}_0(t) = X_0(t) / \bar{X}_0 \quad (4)$$

$$\bar{X}_i(t) = X_i(t) / \bar{X}_i, t = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

第三,计算灰色关联系数。灰色关联系数可以反映序列之间的吻合度,其中 ρ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$ 。为了避免偏差和离乱,本文设 ρ 的取值为 0.5。灰色关联系数如表 3(下页)所示。

$$r[\bar{X}_0(t), \bar{X}_i(t)] = \frac{\min_t \min_i |\bar{X}_0(t) - \bar{X}_i(t)| + \rho \max_t \max_i |\bar{X}_0(t) - \bar{X}_i(t)|}{|\bar{X}_0(t) - \bar{X}_i(t)| + \rho \max_t \max_i |\bar{X}_0(t) - \bar{X}_i(t)} \quad (6)$$

表 2 产业结构高级化水平

年份	产业结构高级化水平	年份	产业结构高级化水平
2002	2.289	2011	2.351
2003	2.295	2012	2.364
2004	2.283	2013	2.38
2005	2.295	2014	2.393
2006	2.312	2015	2.421
2007	2.327	2016	2.437
2008	2.329	2017	2.443
2009	2.348	2018	2.452
2010	2.349	2019	2.468

数据来源:根据 2003—2020 年《中国统计年鉴》的统计数据计算得出

第四,计算灰关联密度值。对灰色关联系数进行映射处理,所得到的映射值即为分布密度值 $P_i(t)$ 。灰关联密度值如表 4 所示。

$$Map : r_i(t) \rightarrow P_i(t)$$

$$P_i(t) = r_i(t) / \sum_{i=1}^n r_i(t) \quad (7)$$

其中, $P_i > 0$, 且 $\sum_{i=1}^n P_i(t) = 1$ 。

第五,计算灰关联熵以及灰关联熵变(见表 5,下页)。在分布映射的基础上,计算得出灰关联熵 $S(t)$ 以及灰关联熵变 $\Delta S(t)$ 。

$$S(t) = -\sum_{i=1}^m P_i(t) \cdot \ln P_i(t) \quad (8)$$

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t-1) \quad (9)$$

第六,灰关联熵变动的的原因追溯分析。灰关联熵的变化受到数字产业化和产业数字化两个方面的 $|P \cdot \ln P|$ 值的影响,可以通过数字产业化以及产业数字化的 $|P \cdot \ln P|$ 值的计算和分析来探究灰关联熵的变动原因。结果如表 6(下页)所示。

(四)实证检验结果分析

根据灰关联熵的实证检验结果以及灰关联熵变化的原因追溯分析,可以得到如下结论:

1.数字经济促进了我国产业结构的升级

数字经济促进产业结构升级的过程并非一蹴而就,而是一个逐渐融合、不断调整的过程。这一过程大致可以分为两个阶段:

第一阶段,2002—2012年,灰关联熵持续增加。此阶段数字经济还未成为产业结构升级的重

表 3 灰色关联系数

年份	数字产业化	产业数字化	年份	数字产业化	产业数字化
2002	0.618	0.580	2011	1.015	0.850
2003	0.624	0.586	2012	1.003	0.957
2004	0.679	0.589	2013	0.902	1.000
2005	0.699	0.603	2014	0.828	0.819
2006	0.749	0.605	2015	0.735	0.723
2007	0.715	0.641	2016	0.683	0.579
2008	0.800	0.655	2017	0.576	0.482
2009	0.799	0.714	2018	0.559	0.409
2010	0.850	0.780	2019	0.507	0.355

数据来源:根据表 1、表 2 及 2003—2020 年《中国统计年鉴》相关数据计算得出

表 4 灰关联密度值

年份	数字产业化	产业数字化	年份	数字产业化	产业数字化
2002	0.046	0.049	2011	0.076	0.071
2003	0.047	0.049	2012	0.075	0.080
2004	0.051	0.049	2013	0.068	0.084
2005	0.052	0.051	2014	0.062	0.069
2006	0.056	0.051	2015	0.055	0.061
2007	0.054	0.054	2016	0.051	0.049
2008	0.060	0.055	2017	0.043	0.040
2009	0.060	0.060	2018	0.042	0.034
2010	0.064	0.065	2019	0.038	0.030

数据来源:根据表 1、表 2 及 2003—2020 年《中国统计年鉴》相关数据计算得出

表 5 灰关联熵及灰关联熵变

年份	灰关联熵	灰关联熵变	年份	灰关联熵	灰关联熵变
2002	0.289	—	2011	0.384	0.030
2003	0.291	0.002	2012	0.397	0.013
2004	0.300	0.009	2013	0.390	-0.007
2005	0.305	0.005	2014	0.356	-0.033
2006	0.313	0.008	2015	0.330	-0.027
2007	0.314	0.001	2016	0.299	-0.031
2008	0.328	0.014	2017	0.265	-0.034
2009	0.337	0.009	2018	0.249	-0.017
2010	0.354	0.017	2019	0.229	-0.020

数据来源:根据表 1、表 2 及 2003—2020 年《中国统计年鉴》相关数据计算得出

要推动力量。主要原因在于,经历了 21 世纪初的互联网经济泡沫之后,全球数字经济的发展进入低迷期,发展较为迟缓。虽然我国当时也提出了信息化战略,但是信息技术领域未获得突破性进展,信息产业规模增速缓慢,信息技术对产业的渗透也仅限于企业内部业务的信息化升级替代,

对产业结构升级作用不明显。

第二阶段,2013—2019 年,灰关联熵开始持续降低。此阶段灰关联熵的变化连续 7 年为负值,说明数字经济已成为推动产业结构持续升级的重要力量。原因在于,2008 年金融危机爆发以后,我国抢抓历史机遇大力发展数字经济,并积

表 6 数字产业化与产业数字化的 $|P \cdot \ln P|$ 值

	数字产业化		产业数字化		数字经济	
	$ P \cdot \ln P $	$\Delta P \cdot \ln P $	$ P \cdot \ln P $	$\Delta P \cdot \ln P $	灰关联熵	灰关联熵变
2002	0.142	—	0.147	—	0.289	—
2003	0.143	0.001	0.148	0.001	0.291	0.002
2004	0.152	0.008	0.149	0.000	0.300	0.009
2005	0.155	0.003	0.151	0.002	0.305	0.005
2006	0.162	0.007	0.151	0.000	0.313	0.008
2007	0.157	-0.005	0.157	0.006	0.314	0.001
2008	0.169	0.012	0.159	0.002	0.328	0.014
2009	0.169	0.000	0.169	0.009	0.337	0.009
2010	0.175	0.007	0.178	0.010	0.354	0.017
2011	0.196	0.021	0.188	0.010	0.384	0.030
2012	0.195	-0.001	0.202	0.014	0.397	0.013
2013	0.182	-0.012	0.208	0.005	0.390	-0.007
2014	0.172	-0.010	0.184	-0.024	0.356	-0.033
2015	0.160	-0.013	0.170	-0.014	0.330	-0.027
2016	0.152	-0.008	0.147	-0.023	0.299	-0.031
2017	0.136	-0.016	0.130	-0.017	0.265	-0.034
2018	0.133	-0.003	0.116	-0.014	0.249	-0.017
2019	0.124	-0.009	0.105	-0.011	0.229	-0.020

数据来源:根据表 1、表 2 及 2003—2020 年《中国统计年鉴》相关数据计算得出

极推进产业的数字化转型。服务业成为数字技术赋能主战场,既而依次渗透于工业、农业,数字经济促进产业结构升级的作用逐渐显现。

2.数字产业化、产业数字化对我国产业结构升级的影响存在差异性

从时间的维度来看,产业数字化促进产业结构升级的时间滞后性相对较长。自2012年起,数字产业化的 $\Delta|P \cdot \ln P|$ 值就开始转变为负值,相对较早地成为产业结构升级的驱动力量。然而,产业数字化的 $\Delta|P \cdot \ln P|$ 值直至2014年才由正值转为负值,说明产业数字化促进产业结构升级的效应具有时间滞后性,主要原因在于产业数字化需要以数字产业化为支撑,同时产业数字化赋能传统产业需要在解构既有生产模式的基础上重塑新的生产模式,而这是一个相对较为漫长的过程。

从影响效果的维度来看,产业数字化促进产业结构升级的效果更为显著。通过比较2014—2019年数字产业化以及产业数字化的 $\Delta|P \cdot \ln P|$ 值可知,产业数字化对灰关联熵变化的贡献程度大于数字产业化对灰关联熵变化的贡献程度。特别是在重大突发危机面前,产业数字化对产业结构的影响尤为突出。新冠肺炎疫情暴发导致我国诸多行业面临较大挑战,然而第三产业凭借其较高的数字化渗透率逆势发展。根据国家统计局发布的2020年国民经济运行数据,由于第三产业比重不断提升,我国产业结构的高级化发展态势得以继续保持。

未来我国在大力发展数字产业的基础上,应更加重视并推动产业数字化的发展,制定全方位、立体化的措施为传统产业的数字化转型保驾护航,加快产业数字化升级步伐。

四、结论及政策建议

本文在对数字经济特征进行深刻剖析的基础上,探究了数字经济促进产业结构升级的内在机理与基本路径;运用灰关联熵模型实证检验了

数字经济与我国产业结构之间的关系,并根据耗散结构理论的熵变原理探究了数字经济影响下产业结构升级的规律;最后,通过灰关联熵变动原因追溯分析,比较了数字产业化、产业数字化对我国产业结构升级影响的差异性。实证结果表明:第一,现阶段数字经济已经成为我国产业结构升级的持续动力源泉。展望未来,继续以数字经济的高质量发展引领产业结构升级将是突破经济发展瓶颈的重要路径。第二,数字产业化是产业结构升级的基础性和先导性条件,数字产业化的增量扩张对产业结构升级具有促进作用。第三,产业数字化对产业结构升级的促进效应更为显著。我国传统产业的数字化转型是一片广阔蓝海,传统产业的存量优化将是未来产业结构升级的关键领域。因此,产业数字化升级是促进我国产业结构升级工作的重中之重。

基于以上分析结论,我们认为,未来要更加重视和促进数字经济发展,以数字经济的高质量发展引领产业结构升级,将数字产业化和产业数字化作为产业结构升级的重要抓手,进而实现我国经济结构的转型升级和经济高质量发展,加快建立与发展现代产业体系,推动经济体系优化升级。

(一)迅速推进新型数字基础设施建设,夯实数字经济发展根基

新型数字基础设施是数字产业化的产物,是产业数字化的载体,是数字经济高质量发展的战略基石。除了具备基础性、公共性和强外部性等本质属性外,新型数字基础设施还具有系统性、规模经济性、长周期性等典型特征,深刻地影响着我国未来的核心竞争力。因此,新型数字基础设施的建设应从战略目标、部署、路径、运营等方面进行全方位统筹规划。具体而言,应从如下方面着手:第一,新型数字基础设施的建设应该服务于当前我国“双循环”的经济格局,以优先满足国内需求作为建设的出发点和落脚点,形成新基建供给与需求的动态平衡。以更加自信和更加开放

的姿态积极参与国际合作,共同承担区域性乃至全球性的新型数字基础设施建设,为未来我国数字经济辐射全球铺平道路。同时,扩大基础公共信息数据安全有序开放,加快建设国家数据统一共享开放平台。第二,新型数字基础设施建设应该坚持“全国一盘棋”,前瞻性地统筹谋划,兼顾区域协调发展,推动新型数字基础设施向中西部地区倾斜,弥补前期不均衡发展所造成的区域“数字鸿沟”。开展区域、行业和企业数字化转型促进中心建设,强化数字化转型公共服务,降低数字转型门槛^[34]。加强数字社会、数字政府建设,迅速提升公共服务、社会治理等数字化智能化水平。第三,创新新型数字基础设施的建设方式和投融资渠道。积极发挥政府作用和市场的决定性作用,坚持“细水长流”的建设理念,秉持竞争中性和原则,激发各类市场主体活力,鼓励多种所有制类型的市场主体按照市场化运行规则参与新型数字基础设施建设。建立数据资源产权、交易流通、跨境传输和安全保护等基础制度和标准规范,积极稳妥地推动数据资源开发利用。第四,重视新型数字基础设施运营管理。在重建设的同时更加重视运营,让数据真正地“跑起来、用起来”,通过“数字孪生”实现对物理世界的调控和优化。

(二)大力加强前沿核心技术自主创新,超前布局未来数字产业

数字产业化是形成新产业、实现产业增量扩能的重要路径,也是产业数字化的支撑和保障,在促进产业结构升级中发挥着基础性和先导性作用。但是,当前我国数字产业化动力不足,原因在于核心技术、前沿高科技、基础性创新即“核高基”薄弱,数字技术转化及应用场景受限。为此,未来数字产业化的战略布局需要关注以下方面:第一,瞄准数字经济领域的前沿核心技术,确定未来数字产业化方向。当前,量子信息、生物信息、人工智能等领域显现革命性突破先兆,需要以战略思维,前瞻性地布局未来的数字产业化战略,科学引导企业发展方向。第二,构建“政用产学研

资”合作创新共同体,实现“六位一体”协同创新。积极参与数字领域国际规则和标准制定,以数字技术标准的制定引领创新,实现跟随式发展向引领式发展的转变。第三,加大数字产业化中试基地和应用场景实验室建设,畅通数字技术产业化的“最后一公里”。中试基地作为连接前端研发与后端产业化的中间桥梁,是培育新兴产业的重大催化剂与加速器^[35];应用场景实验室则是促进数字技术在各个垂直行业应用快速落地的中枢节点。要积极布局以企业为主体的开放式的数字产业中试基地和应用场景实验室,解决数字技术产业化过程中的难点和断点,补短板、锻长板,确保产业链的安全稳定和自主可控,最终打通产业链和创新链。

(三)统筹兼顾全国数字产业空间布局,促进数字产业协调发展

当前我国区域之间的“数字鸿沟”较大,东中西部地区之间数字产业发展呈现梯度递减趋势。根据中国信息通信研究院发布的《中国数字经济发展白皮书 2020》的相关数据,作为推动区域产业结构升级、极具创新能力的数字产业在广东、江苏、北京等地 GDP 中的占比超过 15%,而在大多数中西部省份中占比还没有超过 5%。迈入数字经济时代,数字产业化的空间布局将是影响区域经济协调发展的重要因素,在我国新旧经济范式转换和产业结构转型升级的关键历史时期,需要以数字产业的合理空间布局奠定未来区域之间的协调发展基础。具体而言,要从如下方面着手:第一,加大新基建向中西部倾斜,弥补区域之间数字基础设施鸿沟。5G 是新基建的根基,也是经济社会未来网络化、数字化、智能化发展的最根本的数字基础设施。要大力推进中西部地区 5G 基站建设,实现 5G 网络全面覆盖;积极在中西部地区布局大型数据中心,与全国数据中心以及其他区域数据中心之间形成良性互动,发挥数据中心的汇聚与辐射功能;国家工业互联网项目以及智能制造项目要加大向中西部地区倾斜,加

快中西部地区工业互联网的建设和应用,推动中西部地区智能制造水平的跨越式发展。第二,找准数字产业化突破口,实现在全国范围内统筹规划数字产业化的空间布局。与其他通用技术一样,数字技术的创新及应用遵循由易入难、由简入繁的规律,数字产业化的空间布局应找准突破口,循序渐进,形成优势互补的良性发展格局。东部地区技术研发和创新活力较强,市场化、产业化的基础也较为成熟和完善,可集中于数字核心技术的研发,重点发展云计算、大数据、物联网、人工智能等核心产业。东北老工业基地和中部地区的工业基础较为雄厚,尤其是在军工电子的生产方面具有深厚的历史积淀和独特的区域优势,未来可考虑作为电子信息产业和软件业的主战场。而广大的西部地区可优先发展部分门槛低、成本低的电子信息零部件加工和生产,逐步积累数字产业发展的经验、技术和要素,培育数字产业化发展的产业环境,逐步实现由消费型数字经济向生产型数字经济的转型。

(四)加快建立工业互联网的生态系统,实现产业的数字化升级

产业数字化是促进产业结构升级的主引擎,而当前我国的大部分产业正处于“工业 2.0”与“工业 3.0”并行的阶段,产业数字化占 GDP 的比重仅为 27.6%,远低于发达国家平均 50% 的水平。未来我国要成功实现并突破“工业 4.0”,一些传统产业将面临跨越式发展的重任,亟须借助于工业互联网的生态系统实现越级式升级,推动数字经济和实体经济深度融合,打造具有国际竞争力的数字产业。具体而言,要从如下方面着手:第一,转变思维,共建工业互联网生态系统。工业互联网生态系统的构建应采取“工业+互联网”思维,大力鼓励并支持实体经济领域中的领军企业作为工业互联网生态系统的主导者和构建者^[36]。第二,创新生态合作模式,共享工业互联网生态利益。生态合作模式是基于业务价值创造而建立的参与主体之间合作边界清晰、利益共享的合作

模式,能够使生态系统的各参与主体形成更为紧密的合作伙伴关系,共同推进工业互联网生态系统的协同发展。第三,加快企业的数字化转型,奠定工业互联网生态系统建设的微观基础。要积极培育数字经济领军型企业,鼓励核心企业带动上下游企业加快数字化转型,促进产业链向更高层级升级,打造传统产业服务化的新生态^[34]。同时,大力培养集信息技术、工业知识和管理技能于一体的“数据科学家”,为企业的数字化建设和产业的数字化转型储备人才。第四,加快数字化软件服务的更高层次开放,实现补链、扩链、强链并承接创新链转移。对内构建数字化软件服务业良好的生态环境,支持数字化软件服务领域中领军企业的发展,鼓励中小企业共同成长,形成多主体协同创新的联合体;对外实施全球化合作战略,加强数字化软件服务领域的国际合作,产生技术溢出效应,大力发展数字化软件服务外包等外向型业务,稳步推动数字化软件服务出口,加快提升国际竞争力^[37]。 **Reform**

参考文献

- [1]金碚.现阶段我国推进产业结构调整的战略方向[J].求是,2013(4): 56-58.
- [2]马建堂.拥抱数字经济的伟大时代[N].中国经济时报,2018-04-16(001).
- [3]TAPSCOTT D. The digital economy: promise and peril in the age of networked intelligence [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.
- [4]NEGROPONTE N, HARRINGTON R, MCKAY S R, et al. Being digital [M]. New York: Knopf, 1996.
- [5]姜奇平.浮现中的数字经济[M].北京:中国人民大学出版社,1998:16-20.
- [6]MESENBOURG L T. Measuring the digital economy [Z]. Suitland, MD: US Bureau of the Census, 2001.
- [7]QUAH D. Digital goods and the new economy

- [J]. Lse Research Online Documents on Economics, 2003(4): 2-44.
- [8]康铁祥.数字经济及其核算研究[J].统计与决策,2008(5):19-21.
- [9]二十国集团数字经济发展与合作倡议[EB/OL]. (2016-09-29) (2020-08-27).https://www.cac.gov.cn/2016-09/29/c_1119648520.htm.
- [10]裴长洪,倪江飞,李越.数字经济的政治经济学分析[J].财贸经济,2018(9):5-22.
- [11]张鹏.数字经济的本质及其发展逻辑[J].经济学家,2019(2):25-33.
- [12]杨新铭.数字经济:传统经济深度转型的经济学逻辑[J].深圳大学学报(人文社会科学版),2017(4):101-104.
- [13]宋洋.经济发展质量理论视角下的数字经济与高质量发展[J].贵州社会科学,2019(11):102-108.
- [14]PS HEO, DH LEE. Evolution of the linkage structure of ICT industry and its role in the economic system: the case of Korea[J]. Information Technology for Development, 2019, 25(3): 424-454.
- [15]朱春红.信息产业发展与产业结构升级的关联性研究[J].经济与管理研究,2005(9):67-69.
- [16]王宏伟.信息产业与中国经济增长的实证分析[J].中国工业经济,2009(11):66-76.
- [17]齐亚伟,张荣真.工业化进程中信息产业与区域产业结构优化的关联分析[J].统计与决策,2015(24):148-151.
- [18]郭美晨.ICT产业与产业结构优化升级的关系研究——基于灰关联熵模型的分析[J].经济问题探索,2019(4):131-140.
- [19]SUNGJOO LEE, MOON-SOO KIM, YONG-TAE PARK. ICT Co-evolution and Korean ICT strategy: An analysis based on patent data[J]. Telecommunications Policy, 2009, 33(5):253-271.
- [20]昌忠泽,孟倩.信息技术影响产业结构优化升级的中介效应分析——来自中国省级层面的经验证据[J].经济理论与经济管理,2018(6):39-50.
- [21]金志奇.试论信息技术对产业结构变动与升级的作用[J].现代财经,2005(7):74-77.
- [22]戚聿东,肖旭,蔡呈伟.产业组织的数字化重构[J].北京师范大学学报(社会科学版),2020(2):130-147.
- [23]肖旭,戚聿东.产业数字化转型的价值维度与理论逻辑[J].改革,2019(8):61-70.
- [24]李晓华.数字经济新特征与数字经济新动能的形成机制[J].改革,2019(11):40-51.
- [25]张于喆.数字经济驱动产业结构向中高端迈进的发展思路与主要任务[J].经济纵横,2018(9):85-91.
- [26]赵西三.数字经济驱动中国制造转型升级研究[J].中州学刊,2017(12):36-41.
- [27]裘莹,郭周明.数字经济推进我国中小企业价值链攀升的机制与政策研究[J].国际贸易,2019(11):12-20.
- [28]沈运红,黄桁.数字经济水平对制造业产业结构优化升级的影响研究——基于浙江省2008—2017年面板数据[J].科技管理研究,2020(3):147-154.
- [29]李长云.新一代信息技术引致商业模式创新路径研究[J].商业研究,2012(10):149-154.
- [30]张岐山,郭喜江,邓聚龙.灰关联熵分析方法[J].系统工程理论与实践,1996(8):7-11.
- [31]伊·普里戈金.从混沌到有序[M].曾庆宏,沈小峰,译.上海:上海译文出版社,1987:160-183.
- [32]史玉民,胡志强.产业结构演化的耗散结构观[J].科学学与科学技术管理,2004(2):59-61.
- [33]徐德云.产业结构升级形态决定、测度的一

- 个理论解释及验证[J].财政研究,2008(1):46-49.
- [34]陈晓东.以数字经济引领新经济高质量发展[N].无锡日报,2020-05-22(6).
- [35]陈晓东.加快推进供给侧结构性改革 促进实体经济发展与产业创新[J].先锋,2017(9):13-15.
- [36]陈晓东.促进数字经济与实体经济融合发展[N].经济日报,2020-06-17(11).
- [37]陈晓东,杨晓霞.数字经济可以实现产业链的最优强度吗?[J].南京社会科学,2021(2):17-26.

The Impact of Digital Economic Development on the Upgrading of Industrial Structure: Based on the Research of Grey Relational Entropy and Dissipative Structure Theory

CHEN Xiao-dong YANG Xiao-xia

Abstract: In recent years, the digital economy has risen rapidly in the world, which has become a booster for China's high-quality development. In the era of digital economy, the digital upgrading of the industrial structure is obvious. Based on the grey relational entropy model and dissipative structure theory, the empirical research reveals that the impact of the digital economy on the industrial structure shows differences over time. Since 2013, the digital economy has become the source of power for the continuous upgrading of industrial structure in China. By comparing the influence of digital industrialization and industrial digitalization on the upgrading of industrial structure, it is found that the digital industrialization has a leading and fundamental role in the upgrading of industrial structure, while the positive promotion effect of industrial digitalization on the upgrading of industrial structure is more significant. Therefore, the digital economy is an important driving force which can lead the upgrading of the industrial structure in the future. China should rapidly promote the construction of new-type digital infrastructure, implement the strategic and spatial layout of digital industrialization, at the same time, accelerate the transformation of industrial digitalization, which is conducive to achieve higher-quality, more efficient and safer development of China's economy in the post-epidemic era. Also, it is an effective way to accelerate the establishment of a modern industrial system, as well as promote the optimization and upgrading of the economic system.

Key words: digital industrialization; industrial digitalization; industrial structure upgrading; grey relational entropy; dissipative structure theory

(责任编辑:许志敏)