

工业智能化会引发新索洛悖论吗?

——来自城市层面的经验证据

李金城¹ 王林辉²

(1. 吉林大学 经济学院, 吉林 长春 130000; 2. 华东师范大学 经济与管理学院, 上海 200062)

[摘 要] 采用中国城市层面数据, 检验工业智能化是否会诱发新索洛悖论。结果发现: 工业智能化会提升全要素生产率, 并未引发新索洛悖论问题。工业智能化的生产率效应受制于城市属性和主导产业类型的约束, 对于内陆、三线及以上、生产型城市而言, 工业智能化对全要素生产率的提升作用显著。机制检验表明, 工业智能化主要通过优化要素结构与提升技术创新水平驱动全要素生产率增长。进一步研究发现, 市场环境在工业智能化发展中扮演着不容忽视的角色, 改善市场环境有助于强化工业智能化对全要素生产率的促进效应。

[关键词] 工业智能化 全要素生产率 新索洛悖论

一、引言

近年来, 以人工智能为代表的新一代信息技术迅猛发展, 深刻改变了工业领域的生产方式, 为世界各国转变经济发展模式提供了新思路。我国于 2015 年颁布了《中国制造 2025》, 强调加快新一代信息技术与制造业深度融合, 以驱动我国由制造大国向制造强国迈进。我国工业机器人使用量逐年攀升, 已经从 2000 年的 930 台增加到 2019 年的 78.3 万台, 跃居世界第一^[1]。然而, 人工智能技术往往需要与实体企业深度融合才能发挥作用。工业智能化作为人工智能技术与工业生产融合的重要形式, 旨在全面提升工业企业在研发、生产、管理和服务等各个环节的智能化水平。随着智能化生产与生活方式的普及, 学界开始关注工业智能化的经济社会效益, 如工业智能化对经济增长、产业发展、劳动收入、就业结构等的影响^[2-5], 且普遍认为工业智能化在长期内会带动经济全方位、可持续的增长。

与其他通用型技术一样, 人工智能技术也会在生产生活、社会治理、公共服务等众多领域发挥重要作用^[6]。据相关研究预测, 人工智能技术对经济增长的推动作用将远超蒸汽技术引发的 0.3% 增长率, 预计到 2030 年增长率可能达到年均 1.2%^[7]。那么, 工业智能化发展一定会带动全要素生产率的提升吗? 从历史经验来看却并非如此。例如, 20 世纪 80 年代美国集成电路、半导体等信息技术产业迅猛发展, 但其生产率增长却相对缓慢。1987 年, Solow 更是指出“计算机无处不在, 唯独在生产率统计上不见踪迹”, 这种低生产率与高信息技术投资共存的现象就被称之为“生产率悖论”或“索洛悖论”^[8]。

众多学者围绕索洛悖论的存在性及其成因进行了深入探讨, 但这类研究并未形成共识。一些学者认为索洛悖论并不存在, 即信息与通信技术在长期内能够表现出对生产率的促进作用^[9-10]。而另一些学者却证实了新兴技术具有索洛悖论。Acemoglu 等认为全要素生产率的提升主要源于先进制造设备的使用而非信息与通信技术设备的投入, 其致使信息技术对生产率提升的贡献较低^[11]。Brynjolfsson 等将索洛悖论的成因总结为对新兴技术预期影响的高估、生产率的测量误差、新兴技术

[基金项目] 教育部哲学社会科学后期资助重大项目“工业智能化的经济地理格局重塑效应研究: 技术偏向与微观机制”(22JHQ011) 成果之一。

[作者简介] 李金城(1986—), 男, 吉林长春人, 吉林大学经济学院博士后, 研究方向: 技术创新与经济增长。

红利的分配不均以及新兴技术产生实际影响的时滞性等^[12]。人工智能技术作为信息技术的高阶形态,极大拓宽了智能化生产领域,其对生产率的促进作用可能会达到前所未有的程度^[13],但也有部分学者指出人工智能技术在推动经济增长方面未得到统计数据的支撑^[14]。此外,前沿文献主要关注的是发达国家,而发展中国家不同于发达国家的经济结构、发展阶段与制度环境可能会影响人工智能技术的生产率效应^[15]。那么,对于我国而言,由人工智能技术驱动的工业智能化发展,是会打破传统信息技术在生产率方面的障碍,还是会表现出新索洛悖论现象呢?回答这一问题不仅有助于揭示工业智能化对生产率的作用机理,而且可以为政府部门及时制定相关政策,以引导工业智能化对经济高质量发展的积极影响提供经验借鉴。

基于此,本文选取2010—2019年我国地级市面板样本,多维度构造工业智能化评价指标,检验我国工业智能化是否会诱致新索洛悖论。本文的边际贡献在于,从人工智能技术与工业生产相融合的工业智能化视角考察其对全要素生产率的影响,从城市和产业维度识别新索洛悖论存在的可能性。

二、理论分析与研究假说

全要素生产率是决定经济发展成效的关键,向来受到经济学界的广泛关注,生产率悖论则是其中重要的议题之一。自20世纪80年代起,伴随个人计算机的逐步普及以及互联网的商用化发展,美国投入大量资金以促进信息技术产业发展,但有学者发现该类产业出现了生产率缓慢增长甚至停滞的现象。以罗伯特·索洛为代表的经济学家开始探寻该现象背后的原因,被称为“索洛悖论”问题^[9]。近年来,人工智能技术应用范围不断扩大,程度不断加深,欧美国家的生产率却长期处于低迷状态,关于智能化时代新索洛悖论的讨论不绝于耳^[16],引起学界对其成因的广泛关注,其中得到更多认同的观点是人工智能技术对生产率的影响具有滞后性。换言之,工业智能化效应的显现依赖于人工智能技术向相应产业的渗透速度与范围,只有当人工智能技术达到一定规模或者产生广泛影响时才可能提升生产率^[14]。此外,工业智能化在以机器替代低技能劳动力的同时,也会增加对编程、智能操作、数据分析等高技能人才的需求^[17],而高端人才往往需要经过长时间的技能学习或职业培训才能适应新的智能化岗位,在初期会弱化工业智能化对生产率的促进作用。

然而,工业智能化会通过多种途径推动全要素生产率增长。第一,工业智能化通过优化要素结构而促进全要素生产率增长^[18]。首先,机器人、无人汽车、自动化系统等智能设备,可以完全替代低技能劳动力完成部分重复型、常规型和高危型工作任务,从而实现工业生产的自动化。当智能机器的成本低于劳动力时,工业智能化可以通过使用更多智能机器来提高全要素生产率。同时,智能机器不会因长时间工作而出现专注度下降的情况,因而生产率的减缓速度也会远低于人类劳动力。其次,新任务的产生与知识密集型岗位的创造^[19],会引发高技能人才集聚,进而带动组织、管理、生产流程再造,实现生产效率的提升。工业智能化的另一大典型特征是通过搭建智能化平台,高效聚集与整合信息、数据、技术、知识等资源,使得企业可以在云端完成对研发、生产、销售、管理等全产业链环节的监控,同时可以动态感知市场需求,帮助企业及时发现并调整生产与销售计划的不足,从而实现个性化定制与柔性化生产模式,促进企业提质增效。最后,工业智能化有助于突破企业间、行业间及地区间信息交换的时空障碍,提高不同单位之间的信息传输效率,从而有效引导生产要素的跨部门流动,实现要素结构的优化,进而提升全要素生产率。第二,工业智能化会通过提升技术创新水平的方式推动全要素生产率的增长。伴随海量数据累积、数据存储与分析能力提升和计算能力快速突破,智能设备通过对大量数据资源反复训练,逐步形成自我学习与强化功能^[20-21],如当前ChatGPT正以超乎人类预期的速度不断进化。同时,工业智能化会吸引大量人才、资金与技术等创新资源的流入,通过改善信息环境,加强不同创新主体之间的知识交流频率,以增强知识溢出效应,从而促进技术创新水平的提升,驱动全要素生产率增长。据此,本文提出假说1。

假说 1:工业智能化通过优化要素结构和促进技术创新提升全要素生产率。

工业智能化以海量数据资源作为关键要素投入,并且需要以人工智能为代表的新一代信息技术作为核心驱动力,才能实现对工业生产过程的智能化改造^[22]。不难发现,庞大的市场规模、完善的网络基础和尖端的核心技术是工业智能化的重要支撑,表明工业智能化发展会受到特定资源的约束,并且在初始阶段还需要大量的人才与资金投入,相关设备的研发、安装、维护均需要高昂的经费支持^[23]。然而,现实中由于自然条件、地理位置、制度环境、文化传统等方面的影响,资源在地区间的分布并不均衡,尤其对于地大物博、幅员辽阔的我国而言更是如此。例如,东部地区的贸易条件便利、人才与资金充沛,科技创新处于领先地位,而中西部地区的土地面积广阔、自然资源丰富。不同地区不仅拥有的资源禀赋千差万别,而且市场环境也存在明显差异,这就可能导致工业智能化在不同地区的应用情况不尽相同。相较于落后城市经济发达城市可以吸引大量优质的人才、投资者、企业涌入,为工业智能化提供良好的发展环境。此外,依据独特的资源禀赋和政策条件,各地区逐步形成了特色鲜明的主导产业,如东北老工业基地、上海国际金融中心、内蒙古能源基地等。当前,人工智能技术偏向于替代劳动力执行程式化特征突出的常规型任务,而需要应对复杂外部环境、规则多变的非常规型任务仍只能由劳动力执行^[24],那么常规任务更密集的工业相对非常规任务更密集的服务业,更易与人工智能技术深度融合,致使主导产业类型不同地区的工业智能化进程可能存在差异。据此,本文提出假说 2。

假说 2:工业智能化的生产率提升效应会受制于城市属性与产业类型条件的约束。

三、研究设计

基于前述理论分析与研究假说,为实证检验工业智能化是否会诱致新索洛悖论,本文利用中国 2010—2019 年地级市面板数据,构建如下双向固定效应回归模型:

$$tfp_{it} = \alpha_0 + \alpha_1 inte_{it} + \sum \alpha_j X_{jit} + \nu_i + \rho_t + \varepsilon_{it} \quad (1)$$

其中, i 与 t 分别表示城市与年份, tfp_{it} 表示城市全要素生产率, $inte_{it}$ 表示工业智能化水平, X_{jit} 表示财政支出、外商投资、经济集聚、人口密度与工业规模等控制变量, ν_i 与 ρ_t 分别表示地区与时间固定效应, ε_{it} 表示随机扰动项。

被解释变量:全要素生产率(tfp)。纵观现有文献,全要素生产率的度量方法主要有随机前沿分析法(SFA)与数据包络分析法(DEA)两种^[25]。鉴于随机前沿分析法无法避免因生产函数误设而导致的结构偏差,而数据包络分析法无需设定生产函数,且能够解决截面生产技术的异质性问题^[26],因此本文选择数据包络分析法测算城市全要素生产率。具体而言,借鉴杜运周等的思路^[27],在选取投入变量与产出变量的基础上,通过构建 DEA-SBM 模型和 DEA-EBM 模型测算城市层面全要素生产率。投入变量包括劳动力与资本,本文采用城市从业人数表征劳动力投入,采用张军等提出的永续盘存法计算的固定资本存量表征资本投入^[28],产出变量以地区实际生产总值表征。

核心解释变量:工业智能化($inte$)。工业智能化是在工业互联网环境中通过投入海量数据资源,利用新一代信息技术智能化改造传统工业生产方式的过程。工业智能化蕴含丰富内涵,无法仅通过单一指标如机器人或人工智能专利准确衡量。孙早和侯玉琳从基础建设、生产应用、竞争力和效益等方面构建了工业智能化的统计指标体系,并应用主成分分析法测算了我国省份层面的工业智能化水平^[29]。然而,其选用的部分指标未能准确区分智能化与信息化,且样本受限于省份层面。为此,本文借鉴胡晟明的思路^[30],从网站建设、光缆铺设、智能供应链、大数据服务、信息技术服务、机器人渗透度、互联网宽带接入、移动互联网使用、人工智能专利、创新人才投入、创新资金投入、网络运营与维护、智能安全管理等 13 个子维度构建地级市层面的工业智能化统计指标体系,并且采用因子分析法合成工业智能化指数,具体计算过程中对工业智能化指数取对数处理。

控制变量:财政支出(fis)采用地方政府一般公共预算支出与地区生产总值之比表征;外商投资(fdi)选取规模以上工业企业中外资企业数量占比表示;经济集聚(eag)采用地区生产总值与土地面

积之比度量;人口密度(*pod*)选取单位面积的人口数表征;工业规模(*mak*)采用规模以上工业企业数量取对数来测度。表 1 给出了主要变量的描述性统计分析结果。

表 1 变量描述性统计					
变量	观测值	均值	标准差	最小值	最大值
<i>tfp</i>	1670	1.002	0.07	0.417	1.743
<i>inte</i>	1670	-3.374	0.615	-5.123	0
<i>fis</i>	1670	0.171	0.071	0.044	0.581
<i>fdi</i>	1670	0.046	0.051	0.002	0.323
<i>eag</i>	1670	0.26	0.445	0.001	6.384
<i>pod</i>	1670	0.05	0.034	0.001	0.265
<i>mak</i>	1670	6.802	1.006	3.091	9.513

本文剔除关键变量存在较多缺失值的样本后,获得 2010—2019 年地级市面板数据。工业智能化的测度数据取自中国专利数据库、国际机器人联合会、天眼查企业数据库和《中国城市统计年鉴》;全要素生产率及控制变量的测度数据主要来源于《中国城市统计年鉴》及各省区市统计年鉴。

四、实证检验结果与评价

(一)基准检验

表 2 汇报了工业智能化对全要素生产率影响的基准检验结果,其中(1)列和(2)列以 DEA-SBM 模型测算的全要素生产率为被解释变量,(3)列和(4)列以 DEA-EBM 模型测算的全要素生产率为被解释变量,(1)列和(3)列未控制时间固定效应,(2)列和(4)列同时控制了时间和地区固定效应。结果显示,无论采用 DEA-SBM 模型还是 DEA-EBM 模型测算全要素生产率,工业智能化均至少在 10%的显著性水平上对全要素生产率存在正向影响,表明当前我国工业智能化发展并未诱致新索洛悖论,而是显著提升了城市全要素生产率。这可能因为人工智能技术融入工业生产过程,不仅会通过弥补传统要素的不足提高生产效率,还能有效整合不同部门的信息资源,从而实现全要素生产率的提升。

(二)稳健性检验

为了避免样本选取、指标测算、异常值、遗漏变量等造成的估计偏误,本文在上述基准检验的基础上,通过替换工业智能化的度量指标、对连续型变量进行缩尾处

理、排除政策干扰、考察可能的遗漏变量等多种方式进行稳健性检验,结果如表 3 所示。(1)替换工业智能化的度量指标。鉴于人工智能技术是工业智能化的核心驱动力,为此本文采用人工智能专利授权数替代工业智能化综合指数度量工业智能化水平,其中人工智能专利根据专利标题及摘要中是否包含与人工智能相关的关键词进行识别,并且依据专利地址信息,将专利加总至地级市层面。表 3

表 2 基准检验				
	(1)	(2)	(3)	(4)
	SBM		EBM	
<i>inte</i>	0.0273*** (0.0069)	0.0134* (0.0071)	0.0292*** (0.0068)	0.0102* (0.0061)
<i>fis</i>	-0.0238 (0.0691)	-0.0712 (0.0776)	0.0381 (0.0654)	-0.0189 (0.0724)
<i>fdi</i>	-0.3794** (0.1784)	-0.0710 (0.1693)	-0.4174*** (0.1610)	-0.0652 (0.1529)
<i>eag</i>	-0.0210 (0.0176)	-0.0235 (0.0162)	-0.0546*** (0.0155)	-0.0599*** (0.0142)
<i>pod</i>	-0.1597 (0.7220)	0.0162 (0.5869)	0.4545 (0.6256)	0.5737 (0.5006)
<i>mak</i>	-0.0247*** (0.0090)	-0.0245*** (0.0080)	-0.0394*** (0.0086)	-0.0324*** (0.0076)
<i>_cons</i>	1.3159*** (0.0913)	1.2868*** (0.0773)	1.4181*** (0.0868)	1.3161*** (0.0740)
时间固定	否	是	否	是
地区固定	是	是	是	是
N	1670	1670	1670	1670
R ²	0.1304	0.2809	0.2293	0.3740

注:***、**与*分别表示在 1%、5%和 10%水平上显著,括号内为稳健标准误(下同)

的(1)列结果显示,在替换工业智能化的度量指标之后,工业智能化仍然表现出对全要素生产率的显著正向影响。(2)变量缩尾。为规避极端值的影响,本文对回归变量进行上下 10%的缩尾处理。表 3 的(2)列结果显示,工业智能化对全要素生产率影响的回归系数依旧保持正向显著。(3)排除政策干扰。为抓住新一代信息技术给世界经济发展带来的新机遇,各国纷纷出台相关战略以抢占智能化高地,我国政府于 2015 年发布《中国制造 2025》,2017 年发布《新一代人工智能发展规划》,2021 年印发《“十四五”智能制造发展规划》。不难发现,在 2015 年之后,我国有关智能化发展的政策文件大量涌现。为了排除智能化发展政策的引导作用,从技术发展视角准确识别出工业智能化本身对全要素生产率的影响,本文剔除 2015 年之后的样本重新进行检验。表 3 的(3)列结果显示,工业智能化并未诱致新索洛悖论,而是会提升全要素生产率。(4)加入可能的遗漏变量。由于无法穷尽所有可能对全要素生产率产生影响的变量,本文在梳理现有文献的基础上,考虑到人力资本积累或教育投入的增加也可能有利于促进全要素生产率增长,因此在表 3 的(4)列和(5)列中依次控制了城市人力资本水平(*hcp*)和教育投入水平(*edu*)。结果显示,工业智能化的回归系数均显著为正,从而增强了基准回归结论的可信度。

表 3 稳健性检验

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	替换指标	变量缩尾	排除政策干扰	加入遗漏变量	
<i>inte</i>	0.0130** (0.0064)	0.0181** (0.0082)	0.0430** (0.0204)	0.0131* (0.0072)	0.0141** (0.0072)
<i>fis</i>	-0.0582 (0.0787)	-0.0953 (0.0631)	-0.1052 (0.1547)	-0.0661 (0.0776)	0.0261 (0.0850)
<i>fdi</i>	-0.0293 (0.1708)	-0.1494 (0.2117)	-0.2413 (0.2727)	-0.0745 (0.1695)	-0.1055 (0.1695)
<i>eag</i>	-0.0305* (0.0169)	-0.0218 (0.0386)	-0.0021 (0.0219)	-0.0254 (0.0162)	-0.0244 (0.0162)
<i>pod</i>	0.0589 (0.6003)	-0.2249 (0.8081)	-0.4059 (0.8012)	0.0905 (0.5900)	0.0282 (0.5842)
<i>mak</i>	-0.0227*** (0.0081)	-0.0251*** (0.0065)	-0.0005 (0.0180)	-0.0238*** (0.0079)	-0.0278*** (0.0081)
<i>hcp</i>				0.4085 (0.2944)	
<i>edu</i>					-1.1222* (0.5962)
<i>_cons</i>	1.2217*** (0.0798)	1.3258*** (0.0829)	1.2440*** (0.1499)	1.2592*** (0.0803)	1.3305*** (0.0815)
时间固定	是	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是	是
N	1670	1670	1112	1670	1670
R ²	0.2811	0.3541	0.2677	0.2815	0.2832

(三) 异质性分析

1. 城市区位

我国不同地区的资源禀赋、产业结构、人口规模、科技水平等差异巨大,导致不同地区发展工业智能化的外在条件与内在激励不尽相同,因此对于地处不同区位的城市而言,工业智能化的发展进程及其对全要素生产率的影响可能存在明显差异。为此,本文将城市分类为内陆城市与沿海城市,

检验不同地区工业智能化对全要素生产率的作用,结果如表 4 所示。其中,(1)列和(2)列考察内陆城市,(3)列和(4)列考察沿海城市,(1)列和(3)列仅控制地区固定效应,(2)列和(4)列同时控制地区和时间固定效应。结果显示,在内陆地区,工业智能化对全要素生产率表现出显著的正向影响,而在沿海地区,工业智能化对全要素生产率的影响反而不显著,表明工业智能化会在沿海地区诱致新索洛悖论。这可能源于相较于沿海地区内陆地区工业企业的生产流程与工艺较为落后,因而提升空间更大,工业智能化对全要素生产率的促进作用也更强。

表 4 异质性检验 1:城市区位

	(1)	(2)	(3)	(4)
	内陆地区		沿海地区	
<i>inte</i>	0.0255*** (0.0074)	0.0174** (0.0074)	0.0163 (0.0210)	-0.0176 (0.0227)
<i>fis</i>	-0.0399 (0.0729)	-0.0275 (0.0866)	0.0295 (0.2003)	-0.3907** (0.1771)
<i>fdi</i>	-0.7333** (0.2943)	-0.4441 (0.2823)	-0.1065 (0.2341)	0.3264 (0.2210)
<i>eag</i>	-0.0067 (0.0300)	-0.0067 (0.0288)	-0.0090 (0.0300)	-0.0239 (0.0283)
<i>pod</i>	0.2411 (0.7143)	0.2670 (0.5457)	-0.9991 (1.5733)	0.0915 (1.4006)
<i>mak</i>	-0.0296*** (0.0103)	-0.0224** (0.0090)	-0.0220 (0.0196)	-0.0613*** (0.0185)
<i>_cons</i>	1.3274*** (0.1033)	1.2671*** (0.0859)	1.2801*** (0.1744)	1.4451*** (0.1929)
时间固定	否	是	否	是
地区固定	是	是	是	是
N	1366	1366	304	304
R ²	0.1297	0.2785	0.1508	0.3388

2. 城市等级

在我国经济发展中,经济发达城市往往扮演着经济压舱石的角色,在资源整合方面具备巨大优势,在推动自身经济增长的同时,也会通过要素流动、技术溢出、产业转移等方式带动周边城市发展。而工业智能化依赖大量的人才、资金与技术投入,经济发达城市凭借其资源聚集优势能为工业智能化提供更好的发展环境,因此工业智能化可能对经济发达城市的全要素生产率促进作用更显著。为此,本文基于新一线城市研究院发布的《城市商业魅力排行榜》将城市划分为三线及以上城市(包含一线城市、新一线城市、二线城市、三线城市)和三线以下城市(包含四线城市与五线城市)两大类,检验结果如表 5 所示。其中,(1)列和(2)列采用 DEA-SBM 模型测算全要素生产率,(3)列和(4)列采用 DEA-EBM 模型测算全要素生产率。结果显示,无论采用何种模型度量全要素生产率,工业智能化仅对三线及以上城市的全要素生产率表现出显著促进作用,而对三线以下城市的全要素生产率影响不显著。面对新一代信息技术的快速普及,高等级城市凭借雄厚的资金与充足的人力资本能够更迅速作出反应,而低等级城市则因受到资源约束,工业智能化生产率效应的发挥受到抑制。

表 5 异质性检验 2:城市等级

	(1)	(2)	(3)	(4)
	SBM		EBM	
	三线及以上城市	三线以下城市	三线及以上城市	三线以下城市
<i>inte</i>	0.0171* (0.0101)	0.0065 (0.0109)	0.0147* (0.0078)	0.0061 (0.0098)
<i>fis</i>	-0.2440 (0.2007)	0.0276 (0.0873)	-0.2017 (0.1475)	0.0194 (0.0897)
<i>fdi</i>	0.0060 (0.1977)	-0.2882 (0.4037)	-0.0386 (0.1749)	-0.3900 (0.3815)
<i>eag</i>	-0.0249 (0.0186)	0.0261 (0.0831)	-0.0505*** (0.0158)	-0.0749 (0.0751)
<i>pod</i>	-0.1398 (0.7619)	0.3752 (0.8660)	0.5885 (0.6344)	0.7662 (0.8207)
<i>mak</i>	-0.0265* (0.0143)	-0.0212** (0.0091)	-0.0351** (0.0139)	-0.0309*** (0.0086)
<i>_cons</i>	1.3418*** (0.1190)	1.2072*** (0.1055)	1.3727*** (0.1156)	1.2445*** (0.1025)
时间固定	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是
N	837	833	837	833
R ²	0.2670	0.3106	0.3305	0.4308

3. 产业异质性

由于工业企业生产任务的程式化特点突出,而服务业企业生产任务大多复杂多变,因此工业企业的生产任务更易由智能设备执行,会率先受到智能化的冲击。不同城市因资源禀赋和政策环境不同,主导产业类型往往存在差异,一些城市可能具有丰裕的资本要素,更适宜于发展工业,另一些城市可能基于优质的劳动力资源或特殊的地理位置,会优先考虑发展服务业。那么,可以预期若城市的主导产业不同,工业智能化的生产率效应也可能存在明显差异。为此,本文借鉴孙伟增等的思路,将城市划分为服务型城市和生产型城市两大类^[31]。具体而言,若城市第三产业比重高于第二产业,则将该城市分类为服务型城市,反之则分类为生产型城市。表 6 比较了工业智能化对不同主导产业城市全要素生产率的影响差异,其中(1)列和(2)列考察以服务业为主导产业的服务型城市,(3)列和(4)列考察以工业为主导产业的生产型城市。结果表明,无论采用 DEA-SBM 模型还是 DEA-EBM 模型测度全要素生产率,工业智能化仅表现出对生产型城市全要素生产率的显著促进作用,而对服务型城市全要素生产率的影响不显著。面对智能化冲击,工业企业会率先通过使用智能设备和构建智能工厂实现制造方式的深刻变革,尤其是对海量数据的收集、整理、分析,智能系统可以替代或协助人类执行生产任务,极大提升了工业企业生产效率。相反,受限于当前人工智能技术的能力,大量服务型任务仍然只能由人类完成,如理发师、保育员等,因而服务型企业生产效率的提升速度较缓慢。

五、进一步讨论

(一) 机制检验

前述分析结果表明工业智能化能够带来全要素生产率的提升,那么工业智能化究竟如何破除新索洛悖论呢?为此,本文从要素结构优化与技术创新两个维度出发考察工业智能化推动全要素生产率的作用路径。其中要素结构优化(*esq*)采用资本与劳动之比表征,技术创新(*inn*)采取单位劳动力的专利申请数量。检验结果如表 7 所示。其中,(1)列和(2)列分别检验了工业智能化对要素结构优化的影响和工业智能化与要素结构优化共同对全要素生产率的影响,由结果可知工业智能化与要素结构优化系数均显著为正,证实了要素结构优化的机制作用;(3)列检验了工业智能化对技术创新的影响,结果

可知工业智能化系数在 1%水平上显著为正,即工业智能化有助于推动技术创新;(4)列汇报了工业智能化与技术创新共同对全要素生产率的影响,结果可知工业智能化系数不显著而技术创新系数显著为正,为此需进行 Sobel 检验,结果发现 Z 值 2.398,在 5%水平上显著,证实了技术创新的中介效应。由上可知,工业智能化通过要素结构优化与技术创新推动全要素生产率的提升。

表 6 异质性检验 3:产业主导性

	(1)	(2)	(3)	(4)
	服务型城市		生产型城市	
	SBM	EBM	SBM	EBM
<i>inte</i>	-0.0026 (0.0142)	-0.0012 (0.0121)	0.0239** (0.0107)	0.0172* (0.0089)
<i>fis</i>	0.1018 (0.1136)	0.0495 (0.1144)	-0.1634 (0.1754)	-0.1297 (0.1466)
<i>fdi</i>	-0.1782 (0.3371)	-0.2393 (0.2852)	-0.4324 (0.2662)	-0.3413 (0.2537)
<i>eag</i>	-0.0060 (0.0441)	-0.0131 (0.0437)	-0.0396 (0.0276)	-0.0935*** (0.0231)
<i>pod</i>	-0.3765 (1.7756)	-0.4861 (1.7917)	-0.0997 (0.7365)	0.3325 (0.6472)
<i>mak</i>	-0.0019 (0.0175)	-0.0176 (0.0193)	-0.0230 (0.0142)	-0.0198 (0.0131)
<i>_cons</i>	1.0507*** (0.1694)	1.2122*** (0.1873)	1.3559*** (0.1284)	1.2983*** (0.1173)
时间固定	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是
N	518	518	1152	1152
R ²	0.4485	0.5545	0.2821	0.3772

表 7 机制检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	<i>esq</i>	<i>tfp</i>	<i>inn</i>	<i>tfp</i>
<i>inte</i>	0.0449** (0.0187)	0.0115* (0.0068)	0.0013*** (0.0003)	0.0104 (0.0067)
<i>esq</i>		0.0432*** (0.0142)		
<i>inn</i>				2.3557** (1.0310)
<i>fis</i>	-0.5318*** (0.1827)	-0.0482 (0.0788)	-0.0006 (0.0028)	-0.0698 (0.0785)
<i>fdi</i>	0.1938 (0.4259)	-0.0794 (0.1670)	-0.0148 (0.0091)	-0.0361 (0.1699)
<i>eag</i>	-0.1595*** (0.0477)	-0.0166 (0.0157)	0.0029*** (0.0011)	-0.0302* (0.0162)
<i>pod</i>	0.9582 (1.4233)	-0.0252 (0.5761)	0.0658 (0.0418)	-0.1388 (0.5731)
<i>mak</i>	0.0109 (0.0234)	-0.0249*** (0.0080)	0.0002 (0.0003)	-0.0249*** (0.0079)
<i>_cons</i>	0.9191*** (0.2240)	1.2471*** (0.0790)	0.0006 (0.0038)	1.2854*** (0.0771)
时间固定	是	是	是	是
地区固定	是	是	是	是
N	1670	1670	1670	1670
R ²	0.7865	0.2873	0.8235	0.2845

(二) 市场化环境的调节效应

通过前文分析可知,在沿海地区、三线以下、服务型城市中,工业智能化会诱致新索洛悖论,且工业智能化主要通过改善资源配置效率促进全要素生产率增长,那么,我们继续思考通过优化何种外部条件,能够帮助城市破除工业智能化的新索洛悖论。本文在此将进一步讨论市场化环境对工业智能化生产率效应的调节作用。通常,市场化程度高的地区要素能自由流动与高效配置。特别是在智能技术与产业融合过程中新模式、新业态、新产品竞相出现,良好市场化环境可消除市场进出壁垒,可以最大化激发企业的主观能动性,这有利于智能技术的扩散和工业智能化生产率效应的发挥。基于此,本文将市场化环境引入分析框架,考察市场化环境改善如何改变工业智能化对全要素生产率的作用效果。其中,市场化环境(*mar*)采取私营和个体从业人数与从业总人数之比来度量。表 8 报告了市场化环境对工业智能化生产率效应的调节作用检验结果。结果显示,市场化环境与工业智能化的交互项回归系数均至少在 5% 的显著性水平上为正,表明改善市场化环境有助于强化工业智能化对全要素生产率的促进效应。良好的市场化环境可以抑制要素错配与价格扭曲等现象,赋能全要素生产率提升,也能破除信息壁垒,通过信息共享与技术溢出带动相关产业及地区生产率的整体改善。

表 8 调节效应检验

	(1)	(2)	(3)	(4)
	SBM		EBM	
<i>inte</i>	0.0025 (0.0102)	0.0005 (0.0091)	0.0035 (0.0094)	-0.0026 (0.0080)
<i>mar * inte</i>	0.0187** (0.0076)	0.0128** (0.0061)	0.0194*** (0.0073)	0.0127** (0.0059)
<i>mar</i>	0.0787*** (0.0253)	0.0527** (0.0212)	0.0818*** (0.0242)	0.0530*** (0.0200)
<i>fis</i>	-0.0343 (0.0705)	-0.0514 (0.0789)	0.0271 (0.0671)	0.0004 (0.0735)
<i>fdi</i>	-0.1847 (0.1770)	0.0189 (0.1682)	-0.2148 (0.1613)	0.0251 (0.1535)
<i>eag</i>	-0.0090 (0.0174)	-0.0126 (0.0164)	-0.0422*** (0.0151)	-0.0486*** (0.0142)
<i>pod</i>	-0.2645 (0.7117)	-0.0761 (0.5871)	0.3455 (0.6139)	0.4792 (0.5010)
<i>mak</i>	-0.0220** (0.0090)	-0.0230*** (0.0080)	-0.0366*** (0.0086)	-0.0310*** (0.0077)
<i>_cons</i>	1.1973*** (0.0982)	1.2224*** (0.0833)	1.2947*** (0.0919)	1.2519*** (0.0791)
时间固定	否	是	否	是
地区固定	是	是	是	是
N	1670	1670	1670	1670
R ²	0.1536	0.2898	0.2562	0.3843

六、基本结论

工业智能化是否会诱致新索洛悖论?理清这一问题对智能化时代经济发展模式的选择具有重要意义。本文基于中国 2010—2019 年地级市面板数据,实证检验工业智能化对全要素生产率的影响。研究表明:我国工业智能化并未诱致新索洛悖论,可以推动全要素生产率的提升,在经过指标替

换、变量缩尾、排除政策干扰、加入遗漏变量等一系列稳健性检验后结果依然稳健。不过,工业智能化的生产率效应受制于城市属性和主导产业类型的约束,对于内陆、三线及以上、生产型城市而言,工业智能化对全要素生产率的提升作用显著。机制检验表明,工业智能化主要通过优化要素结构与提升技术创新水平驱动全要素生产率增长。进一步研究发现,市场化环境在工业智能化发展中扮演着不容忽视的角色,改善市场环境有助于强化工业智能化对全要素生产率的促进效应。

为了充分发挥新一代信息技术的生产优势,通过工业化与智能化深度融合规避可能存在的新索洛悖论问题,本文提出如下政策建议:首先,工业企业作为智能化改造的主阵地,要及时抓住工业智能化蕴含的巨大机遇,积极主动引进或研发智能技术,将其融入生产流程,同时整合信息资源改善组织管理水平,从而实现生产效率的提升。在此基础上,还要积极引导智能化方向从替代简单劳动力向攻关核心技术转变,加强智能化领域的基础理论研究,助力全要素生产率的持续增长。其次,工业智能化需要以海量数据资源作为关键要素投入,而大量有价值的数据资源被不同部门所掌握,可能会形成了一座座“数据孤岛”。因此,建议政府牵头构建以大数据、云计算、物联网为基础的数字平台,聚合分散在不同部门的数据资源,统筹协调不同地区、产业或企业的发展需求,以海量数据与信息共享为依托助力工业智能化生产率效应的发挥。最后,通过优化市场环境强化工业智能化对全要素生产率的促进作用。改善市场环境有助于提高资源配置效率,吸引人才、资金、技术等优质资源集聚,加速智能技术的规模化应用,以良好的经营秩序、完善的产权保护、公平的竞争环境破除市场壁垒,为深入推进工业智能化发展保驾护航。与此同时,为防止资本的无序扩张与企业的盲目跟风行为而导致过度自动化,政府部门也应加强相关法律法规体系的建设,规范企业的投融资渠道,引导企业平稳有序地进行智能化转型升级。

[参 考 文 献]

- [1] 国际机器人联合会:2020 年全球工业机器人报告[EB/OL]. (2020-10-18) [2023-05-10]. https://www.sohu.com/a/425449605_120868898.
- [2] GRAETZ G, MICHAELS G. Robots at Work[J]. Review of Economics and Statistics, 2018, 100(5): 753-768.
- [3] 董直庆,谭玉松,赵贺. 人工智能技术会诱致产业逆向梯度转移吗——来自省际层面的行业经验证据[J]. 学术月刊, 2022, 54(8): 55-66.
- [4] KORINEK A, STIGLITZ J E. Artificial Intelligence and Its Implications for Income Distribution and Unemployment[R]. NBER Working Paper, 2017.
- [5] 王林辉,钱圆圆,宋冬林,等. 机器人应用的岗位转换效应及就业敏感性群体特征——来自微观个体层面的经验证据[J]. 经济研究, 2023, 58(7): 69-85.
- [6] RUSSELL S J. Human Compatible: Artificial Intelligence and the Problem of Control[M]. London: Penguin Press, 2019.
- [7] BUGHIN J, SEONG J, MANYIKA J, et al. Notes from the AI Frontier: Modeling the Impact of AI on the World Economy[R]. McKinsey Global Institute, 2018.
- [8] SOLOW R. We'd Better Watch Out[N]. New York Times Book Review, 1987-12-01.
- [9] 王贵东,杨德林. 互联网提升了制造企业的全要素生产率吗?——我国信息通信技术生产率悖论的再探讨[J]. 统计研究, 2023, 40(6): 63-76.
- [10] 逯海勇,宋培,李琳. 中国新一代信息技术投资能否绕过“索洛悖论”——基于“宽带中国”的准自然实验[J]. 现代财经(天津财经大学学报), 2023, 43(8): 98-113.
- [11] ACEMOGLU D, AUTOR D, DORN D, et al. Return of the Solow Paradox? IT, Productivity, and Employment in US Manufacturing[J]. American Economic Review, 2014, 104(5): 394-399.
- [12] BRYNJOLFSSON E, ROCK D, SYVERSON C. Artificial Intelligence and the Modern Productivity Paradox: a Clash of Expectations and Statistics[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2019.
- [13] AGHION P, JONES B F, JONES C I. Artificial Intelligence and Economic Growth[M]. Chicago: University of Chicago Press, 2018: 237-282.
- [14] 陈楠,蔡跃洲. 人工智能、承接能力与中国经济增长——新“索洛悖论”和基于 AI 专利的实证分析[J]. 经济学动态, 2022(11): 39-57.
- [15] 何小钢,梁权熙,王善骞. 信息技术、劳动力结构与企业生产率——破解“信息技术生产率悖论”之谜[J]. 管理世界, 2019, 35

- (9):65-80.
- [16] 蔡跃洲,付一夫. 全要素生产率增长中的技术效应与结构效应——基于中国宏观和产业数据的测算及分解[J].经济研究,2017,52(1):72-88.
- [17] 谭玉松,任保平,师博. 人工智能影响产业协同集聚的效应研究[J].经济学家,2023(6):66-77.
- [18] ACEMOGLU D, RESTREPO P. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets[J]. Journal of Political Economy, 2020, 128(6): 2188-2244.
- [19] 王林辉,胡晟明,董直庆. 人工智能技术会诱致劳动收入不平等吗——模型推演与分类评估[J].中国工业经济,2020(4):97-115.
- [20] 刘亮,胡国良. 人工智能与全要素生产率——证伪“生产率悖论”的中国证据[J].江海学刊,2020(3):118-123.
- [21] NORDHAUS W D. Are We Approaching an Economic Singularity? Information Technology and the Future of Economic Growth [R]. NBER Working Paper, 2015, No. w21547.
- [22] 鲍达民. 中国人工智能的未来之路[J]. 科技中国, 2017(5): 21-29.
- [23] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化[J]. 中国社会科学, 2016(6): 87-106.
- [24] 王林辉,胡晟明,董直庆. 人工智能技术、任务属性与职业可替代风险:来自微观层面的经验证据[J].管理世界,2022,38(7):60-79.
- [25] 李春霞,张伟,沈小波. 卖空机制能促进企业全要素生产率增长吗? [J].统计研究,2020,37(9):34-43.
- [26] 刘维林,程倩,余泳泽. 双循环技术溢出视角下中国产业技术进步的网络效应研究——基于全球生产网络下的全要素生产率增长与传导测算[J].管理世界,2023,39(5):38-59.
- [27] 杜运周,刘秋辰,陈凯薇,等. 营商环境生态、全要素生产率与城市高质量发展的多元模式——基于复杂系统观的组态分析[J].管理世界,2022,38(9):127-145.
- [28] 张军,吴桂英,张吉鹏. 中国省际物质资本存量估算:1952—2000[J].经济研究,2004,39(10):35-44.
- [29] 孙早,侯玉琳. 工业智能化如何重塑劳动力就业结构[J].中国工业经济,2019(5):61-79.
- [30] 胡晟明. 中国工业智能化对劳动收入不平等的影响研究[D].华东师范大学,2023.
- [31] 孙伟增,牛冬晓,万广华. 交通基础设施建设与产业结构升级——以高铁建设为例的实证分析[J].管理世界,2022,38(3):19-34.

(责任编辑 余 敏)