

数智化、价值链贸易与全球生产网络

谢 杰, 卢东子, 刘艳平, 陈菲菲

[摘要] 大数据算法、生成式人工智能和移动机器人等技术正加速替代非常规任务,推动服务业加速数智化。随着制造与服务边界日益模糊,人机协作普遍兴起,数智化正迈向通用人工智能,并深刻重塑全球生产网络(GPN)。本文构建了一个多国多部门结构估计模型,设置数智化产品价格下降的反事实冲击,模拟其对价值链贸易与网络演化的潜在影响;在简约估计模型部分,运用Bartik工具变量识别了数智化投入变化对价值链贸易的影响,并检验了GPN结构的调节效应。研究发现,数智化普遍促进价值链贸易,其作用在网络密度、互惠性与中心性较高的国家更为显著;在就业与工资层面,呈现出明显的阈值效应,劳动力过剩国家的响应门槛更高。同时,数智化加快推动GPN向着更高的稠密性、韧性与集中度演化,强化了核心经济体的连接性与地位。实证检验证实,GPN结构对数智化的边际影响存在正向调节效应。本文的研究有助于系统理解数智化对价值链流动、就业结构和GPN的重塑机制,为相关政策制定提供理论支持。

[关键词] 数智化; 价值链贸易; 全球生产网络; 结构估计模型; 反事实模拟

[中图分类号] F424 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-480X(2025)08-0064-19

一、引言

随着全球步入数智化时代,数字化与智能化深度融合,正重塑传统生产方式。以生成式人工智能为代表的新一代技术持续突破应用边界,加速迈向通用人工智能(AGI),其泛化能力不断增强,为全球生产分工注入新动能。曾被视为“人类独占”的任务,如汽车驾驶、手写识别等,如今可由智能系统以近似人类的方式完成(Plötz and Fink, 2009)。这一转变标志着人类正在从以“碳基劳动”为主的工业文明,迈向以“硅基智能体”为核心的新型生产体系。大数据算法与移动机器人正加速渗透模式识别密集型领域,替代大量非常规任务。据Frey and Osborne(2017)估算,约47%的美国岗位具有高度自动化替代概率,其中服务业尤为突出。尽管数智化任务边界不断拓展,但短期内仍难以完全替代人工(Christensen et al., 2021),人机协作仍是主流,数智化正成为推动传统产业动能转换与价值链跃迁的关键力量(吕越等, 2020; Zang et al., 2024)。

[收稿日期] 2025-01-21

[基金项目] 国家社会科学基金重大项目“高标准数字经贸规则促进产业链与创新链深度融合的机制研究”(批准号 23&ZD085)。

[作者简介] 谢杰,浙江工商大学经济学院教授,博士生导师,管理学博士;卢东子,浙江工商大学经济学院博士研究生;刘艳平,浙江工商大学经济学院博士研究生;陈菲菲,浙江工商大学经济学院博士研究生。通讯作者:谢杰,电子邮箱:x_j3027@sina.com。感谢匿名评审专家和编辑部的宝贵意见,文责自负。

数智化作为数字化与智能化融合的产物,尽管其定义因语境略有不同,但核心始终围绕“技术支撑—场景应用—产业融合”的逻辑展开。中国信息通信研究院发布的《2024年中国数字经济发展白皮书》指出,数智化产业涵盖信息通信、大数据、人工智能等领域,电子与光学设备是关键支撑。经济合作与发展(OECD)区分了ICT“提供者”(如半导体、通信设备)与“使用者”(如智能制造、金融科技),前者属于产业核心,后者为应用领域。联合国贸易和发展会议(UNCTAD)发布的《2021年数字经济报告》将电子元器件、光学设备和通信服务列为数字经济基础,欧盟统计局发布的《NACE 2.0》亦将其纳入“电子与光学制造”和“通信服务”两类技术供给。综上,本文将电子与光学设备归入数智化投入制造业,信息与通信业归入数智化投入服务业,合称数智化(投入)部门。已有研究对于数智化系统的重构作用仍缺乏深入揭示(胡翠和王宁,2024)。与传统自动化不同,数智化通过数据驱动决策和认知任务重组,显著拓展技术替代边界(Frey and Osborne, 2017),而感知与操作瓶颈则促使企业依赖人机协同完成复杂交互。这种“替代—互补”二元性不仅优化了任务配置,也重塑了全球生产网络的权力结构与地理格局(王林辉等,2022)。

既有文献存在三重局限:一是忽视网络效应。经典模型(Caliendo and Parro, 2015)未考虑全球生产网络拓扑结构对技术溢出的调节效应。二是外生冲击建模不足。Acemoglu and Restrepo (2020)构建的生产网络理论未将数智化视为外生技术供给冲击。三是忽略价值链维度。McNerney et al. (2022)的研究主要聚焦网络扩展机制;胡翠和王宁(2024)的研究未系统纳入数智化与人机协作对任务分配、贸易格局与区域价值链的联动影响。

本文旨在探讨数智化如何通过降低相对生产成本、促进价值链贸易(潘文卿等,2015)来重塑全球生产网络结构。本文的边际贡献体现在以下五个方面:①在明确区分“自动化”与“数智化”概念的基础上,将计算机、电子与光学设备、信息与通信业界定为数智化投入部门,为结构识别提供分类依据。②构建结合生产任务分工与数智化互动的模型,分析其如何通过价值链贸易影响全球网络结构。数智化冲击以其产品价格下降为代理,代表外生技术进步,具较强可识别性。③揭示全球生产网络结构在数智化影响扩散中的调节效应。本文从网络结构角度出发,选取中国、RCEP 主要国家、欧盟和美国,分析数智化带来的国家间差异。④从价值链贸易、网络密度与中心性、就业与工资等维度,系统分析数智化重塑全球生产网络的深层机制。⑤构建嵌套于多国多部门一般均衡模型的结构估计框架,识别数智化对价值链贸易和生产网络的影响,支持反事实模拟与政策评估。

二、理论模型

本文构建了融合数智化任务、价值链贸易与全球生产网络结构特征的结构估计模型,嵌套于多国多部门一般均衡框架中,支持反事实模拟与评估。该模型整合并拓展三类研究路径:一是任务自动化模型(Acemoglu and Restrepo, 2020; Artuc et al., 2023),用于刻画数智化投入对劳动任务的替代效应与边界调整;二是多国多部门李嘉图贸易模型(Caliendo and Parro, 2015),用于描绘中间品和最终品投入结构,构建全球价值链网络;三是生产网络研究(Cerina et al., 2015),通过投入产出数据量化网络密度、互惠性等指标,揭示各国在全球生产体系中的结构嵌入程度。^①

1. 异质性产品和生产阶段

产品种类 $\omega \in [0, 1]$ 在国家 m 的部门 i (服务业或制造业) 中生产, 可用于阶段 1 的中间投入或

^① 本部分的详细推导过程和说明参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

阶段 2 的最终产品。Artuc et al.(2023)将部门 i 中对应的品种集合分别定义为 S_1^i 和 S_2^i , 满足 $S_1^i \cup S_2^i = [0, 1]$ 。若 i 属于阶段 1, 其用于生产复合中间投入 Q_1^{mi} ; 若属于阶段 2, 则产出用于复合产品 Q_2^{mi} 。在 $\omega \in S_1^i$ 的生产中, 任务量为 $T^{mi}(\omega)$, 固定要素为 $F_s^{mi}(\omega)$, 生产函数如下:

$$q^{mi}(\omega) = z^{mi}(\omega)(F_s^{mi}(\omega))^{a_F^{mi}}(Q_1^{mi}(\omega))^{a_M^{mi}}(T^{mi}(\omega))^{a_T^{mi}} \quad (1)$$

其中, $z^{mi}(\omega)$ 服从 Fréchet 分布, 累计分布函数为 $F(z) = \exp(-z^{-\theta})$, $z > 0$; 以 z 效率生产 ω 产品的厂商效率为 $\mu_m^z(z) = \chi_m z^{mi}(\omega)^{-\theta}$, $\chi_m > 0$, $\theta > 0$, 较小的 θ 表示国家间生产率差异大, 产生较强比较优势; $a_F^{mi} + a_M^{mi} + a_T^{mi} = 1$ 意味着规模报酬不变。

假定阶段 s 复合品的价格为 P_s^{mi} , 则通过求解约束极值问题, 得到生产 $z^{mi}(\omega)$ 单位产品的成本:

$$c_s^{mi} = \psi_1^{mi} (r_{s,F}^{mi})^{a_F^{mi}} (P_1^{mi})^{a_M^{mi}} (w_T^{mi})^{a_T^{mi}} \quad (2)$$

其中, $\psi_1^{mi} = (a_F^{mi})^{-a_F^{mi}} (a_M^{mi})^{-a_M^{mi}} (a_T^{mi})^{-a_T^{mi}}$, w_T^{mi} 为复合产品价格, $r_{s,F}^{mi}$ 为固定要素租金率。

国家 m 对部门 i 阶段 s 复合产品的加总为 $Q_s^{mi} = \left[\int_{S_1^i} (q^{mi}(\omega))^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} d\omega \right]^{\frac{\sigma-1}{\sigma}}$, 对最低价供应商的需求可

表示为 $q^{mi}(\omega) = \left(\frac{p^{mi}(\omega)}{P_s^{mi}} \right)^{-\sigma} Q_s^{mi}$; 在 CES 偏好下, 消费者面对多个不同国家供应时选择最低价格

$p^{mi}(\omega) = \min_n \left\{ \frac{c_s^{ni} \cdot \tau^{mni}}{z^{ni}(\omega)} \right\}$; 整理并积分得到部门 i 阶段 s 复合产品价格, 为:

$$P_s^{mi} = \psi_2^i \sum_n \left(\psi_1^{ni} \tau^{mni} (r_{s,F}^{ni})^{a_F^{ni}} (P_1^{ni})^{a_M^{ni}} (w_T^{ni})^{a_T^{ni}} \right) \quad (3)$$

其中, $\psi_2^i = \left[\Gamma \left(\frac{\theta + 1 - \sigma}{\theta} \right) \right]^{\frac{1}{1-\sigma}}$, τ^{mni} 为目的国 m 和来源国 n 间的贸易成本。由此可知, 复合产

品价格与贸易成本、要素价格和供应商国家的中间品价格正相关。

2. 数智化任务

假设产品种类 ω 的复合任务 $T^i(\omega)$ 由连续任务 $k \in [0, 1]$ 通过 CES 技术生产。所有任务均可由劳动完成, 但仅部分任务可被数智化投入替代。本文将数智化产品可覆盖任务区间定义为技术前沿 K^i , $[0, K^i]$ 区间内的任务可由“人机结合”完成, 称为数智化任务 (T^A); $[K^i, 1]$ 区间内的任务则完全依赖劳动, 称为非数智化任务 (T^N)。

完成单位任务 k 所需的劳动和数智化产品投入分别为 $\phi_L \zeta_L(k)$ 和 $\phi_A \zeta_A(k)$ 。其中, ϕ_L 和 ϕ_A 为固定生产率参数; $\zeta_L(k)$ 、 $\zeta_A(k)$ 是反映任务异质性的随机成分, 均服从形状参数为 ν 、尺度参数为 1 的 Weibull 分布, 其密度函数为 $f(\zeta) = \nu \zeta^{\nu-1} e^{-\zeta^\nu}$, $\zeta \geq 0$ 。生产者根据成本最小化原则, 在任务层级上选择投入方式: 若单位成本 $\phi_A \zeta_A(k) w_A < \phi_L \zeta_L(k) w_L^m$, 则任务 k 由数智化产品完成, 其中, w_L^m 为工资, w_A 为数智化产品价格。由此可定义“最优任务集”: $T^{mi} = \{k \in [0, K^i] \mid \zeta_A(k)/\zeta_L(k) < \phi_L^i w_L^m / \phi_A^i w_A\}$ 。在 $[0, K^i]$ 区间内, 数智化产品完成的“最优任务集合”所占比例为:

$$K_A^{mi} = \frac{(\phi_L^i w_L^m)^{-\nu}}{(\phi_A^i w_A)^{-\nu} + (\phi_L^i w_L^m)^{-\nu}} K^i \quad (4)$$

引入生产率调整后的相对成本为 $\varphi^m \equiv \phi_A^i w_A / \phi_L^i w_L^m$, 式(4)简化为:

$$K_A^{mi} = [1 + (\varphi^m)^\nu]^{-1} K^i \quad (5)$$

式(5)表明, 最优任务集占比受以下因素共同影响: ①数智化任务的最高可替代范围 K^i ; ②数智

化替代弹性参数 ν (数智化替代弹性为 $(1+\nu)$); ③相对成本 φ^m 。

当数智化产品价格下降或效率提高时, φ^m 减小, 导致 K_A^{mi} 增大, 意味着更多任务被数智化产品完成。随着通用人工智能 (AGI) 能力增强, 其对复杂任务的泛化能力会拓展 K^i 。在 $[0, K^i]$ 区间内, 数智化与劳动投入的平均单位成本可表示为 CES 聚合形式:

$$w_{T_A}^{mi} = \psi_3 \left[(\phi_A^i w_A)^{-\nu} + (\phi_L^i w_L^m)^{-\nu} \right]^{-\frac{1}{\nu}} \quad (6)$$

其中, $\psi_3 = \Gamma(1 + 1/\nu)$ 为 Weibull 分布下效率 ζ 的数学期望, ν 越小, 表示任务异质性越高、替代弹性越低。在 $[K^i, 1]$ 区间, 任务只由劳动完成, 平均成本为 $w_{T_N}^{mi} = \psi_3 \phi_L w_L^m$ 。

定义成本缩减因子 Ω^{mi} 为使用数智化产品与仅使用劳动时的单位复合任务成本之比, 即:

$$\Omega^{mi} = \frac{K^i w_{T_A}^{mi} + (1 - K^i) w_{T_N}^{mi}}{w_L^m} = \psi_4 \frac{w_T^{mi}}{w_L^m} = 1 - K^i + K^i (1 - K_A^{mi}/K^i)^{1/\nu} \quad (7)$$

其中, $\frac{K_A^{mi}}{K^i} = \frac{1}{1 + (\varphi^m)^\nu}$, 乘数 $\psi_4 = [\Gamma(1 + 1/\nu) \phi_L]^{-1}$ 。

当不使用数智化投入时, $\Omega^{mi} = 1$; 当数智化投入成本为 0 时, Ω^{mi} 最小。进一步, 可得单位复合任务的劳动需求:

$$\Xi^{mi} = \psi_4 \frac{L^{mi}}{T^{mi}} = 1 - K^i + K^i (1 - K_A^{mi}/K^i)^{1+\frac{1}{\nu}} \quad (8)$$

其中, T^{mi} 为总任务产出, L^{mi} 为总劳动需求。由式 (6) 一式 (8) 可得单位复合任务成本 $w_T^{mi} = \Omega^{mi} w_L^m / \psi_4 = \Omega^{mi} w_L^m \psi_3 \phi_L$ 。将其代入式 (2), 可得单位投入成本最终表达式:

$$c_s^{mi} = \psi_5^{mi} (r_{s,F}^{mi})^{a_F^{mi}} (P_1^{mi})^{a_P^{mi}} (\Omega^{mi} w_L^m)^{a_T^{mi}} \quad (9)$$

其中, 价格和成本乘数 $\psi_5^{mi} = \psi_1^{mi} (\psi_3 \phi_L)^{a_T^{mi}}$ 为常数, $\Omega^{mi} \in [0, 1]$, 其值越小, 表示数智化投入越充分, 对降低单位投入成本的作用越大。

3. 劳动和数智化产品需求

在 CES 成本结构下, 通过约束求解成本最小化问题, 可推导出数智化产品的需求函数, 为:

$$A^{mi} = L^{mi} \frac{\phi_A}{\phi_L} \left(\frac{w_L^m}{w_A} \right)^{1+\nu} \quad (10)$$

根据式 (7) 和式 (8), 可得生产任务 T^{mi} 的劳动成本占比 $\frac{\Xi^{mi}}{\Omega^{mi}} = \frac{w_L^m L^{mi}}{w_T^{mi} T^{mi}}$, 数智化成本在总任务成本中所占比例为 $\frac{w_A^m A^{mi}}{w_T^{mi} T^{mi}} = 1 - \frac{\Xi^{mi}}{\Omega^{mi}}$, 那么, 数智化成本相对于工资总成本的比值为 $\frac{w_A^m A^{mi}}{w_L^m L^{mi}} = \frac{\Omega^{mi} - \Xi^{mi}}{\Omega^{mi}}$ 。数智化产品的需求可重新表示为:

$$A^{mi} = L^{mi} \frac{w_L^m}{w_A} \left(\frac{\Omega^{mi}}{\Xi^{mi}} - 1 \right) \quad (11)$$

4. 数智化部门的投入依赖关系

完全消耗系数能揭示制造业与数智化部门之间的直接及间接投入关系, 表示如下:

$$complet_{ij} = a_{ij} + \sum_{l=1}^n a_{il} a_{lj} + \sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^n a_{is} a_{sl} a_{lj} + \dots \quad (12)$$

其中, a_{ij} 表示部门 j 对数智化部门 i 的直接消耗, $\sum_{l=1}^n a_{il} a_{lj}$ 表示通过中间部门 l 对部门 i 的一次间接消耗, $\sum_{s=1}^n \sum_{l=1}^n a_{is} a_{sl} a_{lj}$ 表示通过中间部门 s 和 l 的两次间接消耗, 以此类推。

投入产出表行模型可表示为 $AX + Y = X$, 其中, A 表示直接消耗系数矩阵, X 表示总产出或总投资

入, Y 为最终使用, AX 为中间使用。该模型可改写为 $X = (I - A)^{-1}Y = BY$, $B = (I - A)^{-1}$ 为里昂惕夫逆矩阵。完全消耗系数矩阵可表示为 $(I - A)^{-1} - I = D + D^2 + \dots + D^m$, 据此计算 $complete_{ij}$ 。

在此基础上, 可用依赖度指标衡量制造业对数智化部门的投入依赖强度: ①直接依赖度 (DR^d), 表示部门 j 直接使用的数智化投入占其所有中间投入的比重, $DR^d = \sum_i a_{ij} / \sum_k a_{kj}$, a_{ij} 表示部门 j 对数智化部门 i 的直接消耗, 分母为部门 j 对所有中间投入部门 k 的总消耗。②完全依赖度 (DR^c), 综合反映制造业部门在全部中间使用环节中对数智化投入的依赖强度, DR_{jt}^c 表示部门 j 所有直接与间接消耗中数智化投入占比:

$$DR_{jt}^c = \sum_i \left(\frac{complete_{ij}}{\sum_{k=1}^N complete_{kj}} \right) \quad (13)$$

5. 宏观均衡

设 Y_s^{mi} 为国家 m 的部门 i 在阶段 s 的产品总产值, Q_s^{mi} 表示该产品的总需求, 其为工薪阶层、固定要素所有者、生产者以及数智化产品所有者的需求总和。消费者对部门 i 最终品的需求为:

$$Q_2^{mi} = \frac{1}{P_2^{mi}} \gamma^{mi} \sum_j \sum_s (a_T^{mj} + a_F^{mj}) Y_s^{mj} \quad (14)$$

阶段 1 复合中间品产量用于两阶段生产 ω 类型的产品。由于采用柯布一道格拉斯结构, 阶段 1 复合产品的总需求为部门产值的一个比例: $Q_1^{mi} = \frac{1}{P_1^{mi}} \sum_s a_M^{mi} Y_s^{mi}$ 。国家 m 在阶段 s 对国家 n 的部门 i 的支出为 $Y_s^{mni} = \pi_s^{mni} Y_s^{mi}$, 其中, $Y_s^{mi} = \sum_n Y_s^{mni} = P_s^{mi} Q_s^{mi}$ 。贸易平衡条件为 $B^m = \sum_n \sum_s \sum_i Y_s^{nmi} - \sum_n \sum_s \sum_i Y_s^{mni}$ 。固定要素租金率和工资率分别表示为 $r_F^{mi} = \frac{a_F^{mi} Y_s^{mi}}{F_s^{mi}}$, $w_L^m = \frac{a_F^{mi} Y_s^{mi}}{L_s^{mi}} \frac{\Xi^{mi}}{\Omega^{mi}}$, 其中, Ξ^{mi} 表示单位任务的劳动需求。每个国家的总劳动供给为 $L^m = \sum_i \sum_s (L_s^{mi})$ 。由于工人是完全流动的, 故工资在各部门和各阶段保持相等。国家 m 的消费者价格指数为 $P^m = e^{\sum_j \gamma^{mj} \ln(P_2^{mj})}$ 。

6. 贸易、复合产品价格与数智化产品价格(租金)

根据式(3)、式(9)、 $w_T^{mi} = \Omega^{mi} w_L^m \psi_3 \phi_L$, 可得部门 i 阶段 s 的复合产品价格的又一表达式:

$$P_s^{mi} = \psi_2^i \left[\sum_n \left(\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_s^{ni})^{a_F^{ni}} (P_1^{ni})^{a_U^{ni}} (\Omega^{ni} w_L^n)^{a_T^{ni}} \right)^{-\theta} \right]^{-\frac{1}{\theta}} = \psi_2^i \left[\sum_n (\tau^{mni} c_s^{ni})^{-\theta} \right]^{-\frac{1}{\theta}} \quad (15)$$

其中, $\sum_n (\tau^{mni} c_s^{ni})^{-\theta}$ 表示所有出口国 n 向目的国 m 提供复合产品的加权单位成本之和。式(15)可简化为 $P_s^{mi} = \psi_2^i \sum_n \left(\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_s^{ni})^{a_F^{ni}} (P_1^{ni})^{a_U^{ni}} (\Omega^{ni} w_L^n)^{a_T^{ni}} \right)$, 之所以采用式(15)所示的技术性形式, 主要是为了推导与 Eaton et al.(2011)类似的概率形式引力模型, 从而将控制生产率离散程度的参数 θ 纳入模型。较小的 θ 表示国家间生产率差异更大, 进而带来更强的比较优势。

为了适应本文反事实模拟中“数智化产品价格(租金) w_A 下降”的外生冲击, 需要将 w_A 纳入式(15)。由式(5)中定义的 $\varphi^n \equiv \phi_A^i w_A / \phi_L^i w_L^n$, 可推得 $w_L^n = \phi_A^i w_A / \phi_L^i \varphi^n$, 将其代入式(15)后, 推得复合产品价格的表达式, 为:

$$P_s^{mi} = \psi_2^i \sum_n \left(\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_s^{ni})^{a_F^{ni}} (P_1^{ni})^{a_U^{ni}} (\Omega^{ni} \phi_A^i w_A / \phi_L^i \varphi^n)^{a_T^{ni}} \right) = \psi_2^i \left[\sum_n (\tau^{mni} c_s^{ni})^{-\theta} \right]^{-\frac{1}{\theta}} \quad (16)$$

从中可以看出, 若 w_A 下降, 将引致 Ω^{mi} 下降、任务边界扩大, 从而降低 c_s^{mi} , 最终推动 P_s^{mi} 下降。

因此, 对于阶段 s 的 i 部门, 国家 n 在国家 m 市场收取最低价格的概率表示为:

$$\pi_s^{mni} = \left[\frac{\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_{s,F}^{mi})^{a_{s,F}^{mi}} (P_1^{ni})^{a_{P_1}^{ni}} (\Omega^{ni} \phi_A^i w_A / \phi_L^i \varphi^n)^{a_{\varphi}^{ni}}}{P_s^{mi} / \psi_2^i} \right]^{-\theta} = \left[\frac{\tau^{mni} c_s^{ni}}{\sum_n (\tau^{mni} c_s^{ni})} \right]^{-\theta} = \frac{X_{mni}}{X_{mi}} \quad (17)$$

其中, X_{mni} 表示国家 n 部门 i 向国家 m 市场的出口额, X_{mi} 表示国家 m 在部门 i 上的总进口额, τ^{mni} 为冰山贸易成本, θ 为贸易弹性。进一步可得:

$$X_{mni} = X_{mi} \pi_s^{mni} = X_{mi} \left[\frac{\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_{s,F}^{mi})^{a_{s,F}^{mi}} (P_1^{ni})^{a_{P_1}^{ni}} (\Omega^{ni} w_L^n)^{a_{\varphi}^{ni}}}{P_s^{mi} / \psi_2^i} \right]^{-\theta} = X_{mi} \left(\frac{\tau^{mni} c_s^{ni}}{P_s^{mi} / \psi_2^i} \right)^{-\theta} \quad (18)$$

同样, 将 $w_L^n = \phi_A^i w_A / \phi_L^i \varphi^n$ 代入式(18)后, 可得:

$$X_{mni} = X_{mi} \pi_s^{mni} = X_{mi} \left[\frac{\psi_5^{ni} \tau^{mni} (r_{s,F}^{mi})^{a_{s,F}^{mi}} (P_1^{ni})^{a_{P_1}^{ni}} (\Omega^{ni} \phi_A^i w_A / \phi_L^i \varphi^n)^{a_{\varphi}^{ni}}}{P_s^{mi} / \psi_2^i} \right]^{-\theta} = X_{mi} \left(\frac{\tau^{mni} c_s^{ni}}{P_s^{mi} / \psi_2^i} \right)^{-\theta} \quad (19)$$

上式通过变量 Ω^{ni} 体现出 w_A 下降对成本与出口的联动机制: w_A 下降 $\rightarrow \Omega^{ni}$ 下降 (单位任务成本下降); Ω^{ni} 下降 $\rightarrow c_s^{ni}$ 降低; c_s^{ni} 降低 $\rightarrow P_s^{mi}$ 下降; P_s^{mi} 下降 $\rightarrow X_{mni}$ 增加 (出口提升)。结合式(4)和式(7)进一步可知: w_A 与任务边界 K_A^{mi} 呈负相关, 与相对生产成本 Ω^{mi} 呈正相关, 出口与 Ω^{mi} 呈负相关。由此, 本文得出:

命题1: 当一国数智化产品价格下降时, 该国的数智化任务使用比例上升, 这会降低单位生产成本, 提升生产率, 从而增强出口竞争力, 带动出口增长。

假说1: 一国数智化产品价格下降有助于促进该国出口的增长。

7. 价值链贸易视角下的全球生产网络链条、结构与中心性

(1) 出口国内增加值和进口国外增加值。根据 Koopman et al. (2014) 的价值链贸易框架, 出口国内增加值 $DVA_{mni,t}$ 和出口国内增加值率 $DVAR_{mni,t}$ 的关系可表示为 $DVA_{mni,t} = X_{mni,t} DVAR_{mni,t}$, 其中, $X_{mni,t}$ 为国家 n 部门 i 向国家 m 在 t 年的出口供给总额, 则出口国内增加值的变化率为 $d_{mni,t}^{DVA} = \frac{DVA_{mni,t} - DVA_{mni,t-1}}{DVA_{mni,t-1}}$ 。

类似地, 国家 m 部门 i 对国家 n 在 t 年的进口国外增加值 ($FVA_{mni,t}$) 的变化率为 $d_{mni,t}^{FVA} = \frac{FVA_{mni,t} - FVA_{mni,t-1}}{FVA_{mni,t-1}}$ 。

(2) 全球生产网络的供给与需求链条。供给链条是国家 n 在 t 年的出口国内增加值占全球总出口国内增加值的比例, 作为其在全球供给网络中的出口国内增加值份额强度 $DVAS_{nt} = \frac{DVA_{nt}}{\sum_{n=1}^{43} DVA_{nt}}$, 若 $d_{mni,t}^{DVA} > 0$, 则出口国内增加值的增长强度记作 $g_{nt}^{DVA} = d_{mni,t}^{DVA}$ 。需求链条是国家 m 在 t 年的进口国外增加值 (FVA_{mt}) 占全球总进口国外增加值的比例, 作为其在全球需求网络中的进口国外增加值份额强度 $FVAS_{mt} = \frac{FVA_{mt}}{\sum_{n=1}^{43} FVA_{mt}}$, 若 $d_{mni,t}^{FVA} > 0$, 则进口国外增加值的增长强度记作 $g_{mt}^{FVA} = d_{mni,t}^{FVA}$ 。

(3) 全球生产网络结构特征。可以通过网络密度、聚类系数和互惠性 (Serrano et al., 2007) 刻画全球生产网络结构特征。整体网络密度衡量全球生产网络的紧密程度, 网络密度越大, 说明全球价值链的联系越紧密, 表示为 $Density = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N B_{nm}}{N(N-1)}$, 其中, N 表示生产网络中的经济体数目, 若国家 n 向 m 的出口国内增加值超过特定阈值 (如 1 亿美元、5 亿美元、10 亿美元), 则设 $B_{nm} = 1$, 表示网络节点之间存在连接。较低的阈值可反映更广泛的全球生产联系, 较高的阈值则突出了核心经济体之间的深度嵌入关系。不同的阈值设置有助于揭示全球生产网络在不同层次上的结构特征变化。

整体网络聚类系数体现全球生产网络在面临冲击时的韧性, 是各经济体聚类系数的均值:

$ClustCoeff = \frac{\sum_{n=1}^N Cf_n}{N}$, 其中, $Cf_n = \frac{E_n}{\sum_{m=1}^N B_{nm} \times B_{mn} (\sum_{m=1}^N B_{nm} \times B_{mn} - 1)/2}$, 为 n 经济体的聚类系数, 表示

其网络实际关系数目与可能最大关系数目之比, $E_n = \sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N B_{nm} \times B_{mk} \times B_{km}$, 表示 n 经济体的个体网络去掉 n 经济体后剩余的关系数。

网络互惠性体现双向价值链贸易关系在整体网络中的占比, 在二维网络中, 互惠性提高可反映区域间合作程度的提高, 同时预示生产网络的多维性提升, 表示为 $Reciprocity =$

$$\frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N B_{nm} \times B_{mn}}{2 \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N B_{nm} - \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N B_{nm} \times B_{nm}}。$$

(4) 全球生产网络中心性。网络中心性可通过度中心性和中介中心性衡量 (Cerina et al., 2015)。度中心性表示一个经济体在网络中的连接程度, 可进一步分为入度中心性和出度中心性。入度中心性衡量某经济体作为“接收方”, 从其他节点接收的连接数在所有可能入度中的比例:

$$IDC_m = \frac{InDegree_m}{N-1}, \text{其中, } InDegree_m \text{ 表示指向经济体 } m \text{ 的边数; 仅当 } FVA_{mi} \text{ 超过阈值, 即 } B_{mi} = 1 \text{ 时, 可}$$

视为存在连接, N 为经济体总数。入度中心性反映一个经济体从其他经济体获取价值投入的程度, 其值越高, 说明其在生产网络中作为价值接收方的重要性越大。出度中心性衡量某经济体作为“输出方”, 向其他节点输出连接的能力: $ODC_n = \frac{OutDegree_n}{N-1}$, 其中, $OutDegree_n$ 表示从经济体 n 指向其他

节点的边数; 仅当 DVA_{ni} 超过阈值, 即 $B_{ni} = 1$ 时, 可视为存在连接。出度中心性反映一个经济体作为价值提供方的作用, 其值越高, 说明其在网络中承担更强的输出功能。

中介中心性表示一个节点位于其他节点之间最短路径上的频率, 用来衡量某经济体在连接其他经济体最短路径中所处的“中介”或“桥梁”作用, 定义如下: $BC^e = \sum_{m \neq e \neq n} \frac{\sigma_{nm}^e}{\sigma_{nm}}$, 其中, σ_{nm} 表示从节点 n 到节点 m 的最短路径条数, 仅当 $B_{nm} = 1$ (即两者间存在有效连接) 时计入; σ_{nm}^e 表示从 n 到 m 的最短路径中经过经济体 e 的条数。 BC^e 反映某经济体在协调其他节点之间联系中的关键程度, 其值越高, 说明其在全球生产网络中扮演着更重要的中转与协调角色。

三、机制分析框架

全球生产网络对不同经济体的数智化影响产生调节效应, 其核心机制归为四类: 价值链贸易扩大效应、就业结构与工资水平调整效应、全球生产网络增强效应、全球生产网络结构特征的调节效应。

1. 价值链贸易扩大效应

根据式 (19) 及假说 1, 当一国数智化产品价格 w_A 下降时, 该国出口量 (X_{mni}) 增加; 再根据出口量与出口国内增加值 ($DVA_{mni,t}$) 的正向关系, 可得出该国出口国内增加值同步增长, 即产生价值链贸易扩大效应。由于 w_A 的下降会引起复合产品价格 P_s^{mi} 与单位成本 c_s^{mi} 同步下降, 因此, $DVA_{mni,t}$ 将上升, 即 $d_{mni,t}^{DVA} > 0$, 国家 n 的 $DVA_{mni,t}$ 增长率 g_{nt}^{DVA} 也为正。由此, 本文得出:

命题 2: 当一国数智化产品价格下降, 特别是在劳动成本较高国家, 将加快数智化进程, 提高数智化任务密度, 降低相对生产成本并提升出口国内增加值。

假说 2: 数智化产品价格下降会对价值链贸易产生扩大效应。

2. 就业结构与工资水平调整效应

根据式(10), w_A 下降将提升数智化产品需求,从而带动高技能劳动需求 $L_{hl}^{mi} = f(A^{mi})$ 的增加。数智化也会对低技能劳动产生替代效应,低技能劳动需求变化可表示为 $L_{ll,t}^{mi} = L_{ll,t-1}^{mi} [1 - g(K^i, \phi_A^i, \phi_L^i, v)]$, $g(K^i, \phi_A^i, \phi_L^i, v)$ 表示由数智化任务(K^i)、生产率(ϕ_A^i, ϕ_L^i)和替代参数(v)共同决定的替代效应函数。总劳动需求为 $L_t^{mi} = L_{hl,t}^{mi} + L_{ll,t}^{mi}$ 。这意味着,数智化推动劳动结构转变:若高技能劳动需求增长幅度超过低技能劳动需求下降幅度,则总劳动需求上升。将式(11)变形可得整体工资水平 $w_t^m = \frac{A^{mi} w_A^m}{L^{mi} \left(\frac{\Omega^{mi}}{\Xi^{mi}} - 1 \right)}$,该式说明, w_A 下降对整体工资水平的影响不确定,取决于劳动需

求结构变化净效应。由此,本文得出:

推论1:数智化通过替代低技能劳动、提升高技能劳动需求,改变整体劳动结构。若高技能劳动需求增长大于低技能劳动需求减少,则整体就业与工资水平将上升。

假说3:数智化产品价格下降将推动高技能就业和工资增长;在高技能劳动需求增长超过低技能劳动需求下降的情况下,整体就业和工资水平将提升。

3. 全球生产网络增强效应

(1)结构份额与增长强度。由于各国基础条件和结构差异,不同国家的出口国内增加值增长速度可能存在差异。当 n 国的出口国内增加值增速 g_{nt}^{DVA} 高于全球平均水平时,该国在全球网络中的出口国内增加值份额强度 $DVAS_{nt}$ 将上升,反映其在全球供给网络中的结构地位增强。同时,国家 m 在 t 年的进口国外增加值 FVA_{mt} 实质上对应其贸易伙伴的出口国内增加值,因而也会随 w_A 下降而增长。同样地,若 m 国进口国外增加值增速 g_{mt}^{FVA} 高于全球平均水平,则其在全球需求网络中的进口国外增加值份额强度 $FVAS_{mt}$ 也将增强。由此,本文得出:

推论2:当数智化产品价格下降时,一国出口国内增加值将随之增长。若该国出口国内增加值增速超过全球平均水平,其出口份额强度将上升,在全球供给网络中的增长强度也会增强。同理,随着贸易伙伴国数智化产品价格下降,某国进口国外增加值也将增长。若该国进口国外增加值增速高于全球平均水平,其进口份额强度将上升,同时在全球需求网络中的网络地位也会增强。

假说4:当数智化产品价格下降时,出口国内增加值增速高于全球平均水平的国家,其出口份额强度和增长强度将显著提升,其在全球供给网络中的地位增强;进口国外增加值增速高于全球平均水平的国家,其进口份额强度和增长强度也将提升,其在全球需求网络中的网络地位增强。

(2)网络密度、聚类与互惠性。当 w_A 下降,导致 DVA_{nt} 上升,超过一定阈值的 DVA_{nt} 显著增多,网络有向连接 B_{nm} 数量随之增加,从而提升整体网络密度: $Density = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^N B_{nm}}{N(N-1)}$ 。随着 B_{nm} 的增加,整

体网络的聚类系数也将上升,具体表达为 $ClustCoeff = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\sum_{m=1}^N \sum_{k=1}^N B_{nm} \times B_{nk} \times B_{km}}{\sum_{m=1}^N \frac{B_{nm} \times B_{mn} (\sum_{m=1}^N B_{nm} \times B_{mn} - 1)}{2}}$,

表明经济体之间的价值链关系更为均衡,有助于增强生产网络多维性,提升全球生产网络的稳定性。由此,本文得出:

推论3:当数智化产品价格下降时,出口国内增加值上升,引致全球生产网络密度提升和三角连接关系增多,从而增强生产网络韧性。同时,生产网络的互惠性上升,经济体间价值链贸易更均衡,全球生产体系稳定性进一步增强。

假说5:当数智化产品价格下降时,全球生产网络的密度和聚类系数提升,连通性增强,结构更具韧性,网络稳定性和价值链互惠性显著提高。

(3)连接性与网络中心性提升。当 w_A 下降, DVA_{it} 上升,超过价值链贸易阈值的经济体之间在全球生产网络中连接数(如 $\sum_{m=1}^N B_{nm}$ 或 $\sum_{n=1}^N B_{mn}$)增加;此时,超过一定阈值的 m 经济体的入度中心性和 n 经济体出度中心性随之提升,定义为: $IDC_m = \frac{\sum_{n=1}^N B_{nm}}{N-1}$, $ODC_n = \frac{\sum_{m=1}^N B_{nm}}{N-1}$;同时,超过价值链贸易阈值的 e 经济体的中介中心性也将上升,定义为: $BC^e = \sum_{m \neq e \neq n} \frac{\sigma_{nm}^e}{\sigma_{nm}}$,其中, σ_{nm} 表示从节点 n 到节点 m 的最短路径数量,仅在 $B_{nm} = 1$ 时计入; σ_{nm}^e 表示这些最短路径中经过 e 节点的路径数。当 w_A 下降带来有效连接数的增加时,以 e 为桥梁的路径数量也相应上升,这表明其中介中心性增强,成为更重要的贸易枢纽。由此,本文得出:

推论4:当数智化产品价格下降时,在全球生产网络中,超过价值链贸易阈值的 m 经济体的入度中心性和 n 经济体的出度中心性都得以提升,表明这些经济体在全球生产网络中的连接性增强;同时,超过价值链贸易阈值的 e 经济体的中介中心性增加,也意味着 e 经济体成为网络中的关键桥梁节点,在全球生产网络中的核心地位增强。

假说6:当数智化产品价格下降时,超过阈值的经济体在全球生产网络中的连接性、核心地位增强。

4. 全球生产网络结构特征的调节效应

根据前文可知, w_A 下降产生价值链贸易扩大效应、全球生产网络增强效应;然而,不同经济体从数智化中获得的边际影响可能存在差异,这种差异可能受到全球生产网络(GPN)结构特征的调节效应影响;连接性更强或中心性更高的国家,其在网络中的位置更为优越,有助于信息扩散、技术外溢和任务重构,从而放大数智化所带来的价值链贸易扩张效应。相反,处于网络边缘的经济体由于连接不足、位置不利,可能无法充分释放数智化红利。由此,本文引入如下结构性调节函数: $d_{nit}^{DVA} = f(d_{nit}^{DI} \times GPN_{(n,t-1)}^{Structure})$,其中, d_{nit}^{DVA} 表示国家 n 部门 i 在 t 年的出口国内增加值变化率; d_{nit}^{DI} 为该部门当期数智化投入的变化率; $GPN_{(n,t-1)}^{Structure}$ 表示滞后一期网络结构特征变量,用于刻画网络结构对数智化边际影响的调节效应。由此,本文得出:

命题3:在全球生产网络结构中,网络位置更优(连接性更强、中心性更高)的经济体,其数智化投入对出口国内增加值的边际促进效应更为显著。

假说7:全球生产网络结构特征对数智化的边际影响具显著调节效应;在全球生产网络结构更为优化的经济体中,数智化对价值链贸易的正向影响更强。

四、典型事实

1. 全球及主要经济体的数智完全依赖度和数智完全投入的变化趋势

基于上述理论模型,本文利用亚洲开发银行多区域投入产出表(ADB-MIRO),测算得到各经济体的数智完全依赖度与数智完全投入,由此可分析得到“全球及中国、美国、日本三国三大产业数智完全依赖度变化趋势”与“数智完全投入变化趋势”:2010—2020年,中国制造业、建筑业和服务业的数智完全依赖度均高于美国、日本等其他经济体;在全球范围内,这三类产业数智投入整体呈

波动上升趋势。^①

2. 全球生成网络中的产出乘数与部门价格变化

在结构估计框架下,部门价格和工资的决定机制与数智化产品价格(即使用成本)不同,后者的下降被视为“投资品技术进步”^②。本文量化分析了产出乘数变化下的部门价格演变,其中,产出乘数根据 ADB-MIRO 表计算,部门价格指数采集自“产业水平、增长与生产率研究项目”(KLEMS)数据库^③。结果表明,随着产出乘数上升(即全球生产网络扩张),大多数部门实际价格呈下降趋势,尤以化工、纺织、金属、机械设备、交通运输、健康、教育等部门最为显著,数智制造与服务行业随之下降。这表明,数智技术不仅提升了生产率,还通过压低投入成本带动价格下行。

五、实证分析

1. 模型设定

为探究全球主要经济体的数智化是否以及如何影响价值链贸易,本文设定如下回归模型:

$$d_{nit}^{DVA} = \beta_1 d_{nit}^{DI} + \beta_w \sum_{w=2}^{10} C_{nit} + \mu_n + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{nit} \quad (20)$$

其中, d_{nit}^{DVA} 为 n 国(地区) i 部门在 t 年的出口国内增加值变化率。 d_{nit}^{DI} 为数智化投入变化率,由以下代理变量表示: $d_{nit}^{Dighour}$ 为小时数智完全投入变化率, d_{nit}^{DR} 为数智完全依赖度变化率,二者分别作为核心解释变量进入方程。控制变量 C_{nit} : 劳动补偿对数($\ln LAB_{nit}$)、资本补偿对数($\ln CAP_{nit}$)、就业人数对数($\ln EMPE_{nit}$)、资本存量对数($\ln K_{nit}$)、总产出对数($\ln GOQI_{nit}$)、总增加值对数($\ln VAQI_{nit}$)、中间投入对数($\ln IIQI_{nit}$)、就业补偿对数($\ln COMP_{nit}$)、关税税率($tariff_{nit}$)。 μ_n 、 μ_i 、 μ_t 分别代表国家(地区)、部门、年份固定效应, ε_{nit} 为误差项。

2. 变量测算和数据来源

(1) 数智完全投入与数智完全依赖度。本文使用 2007—2022 年的 ADB-MIRO 表,测算数智完全投入和数智完全依赖度。原始数据涵盖 63 个国家(地区)与 35 个部门,经压缩后整合为 44 个国家(地区)与 22 个部门的世界投入产出表。本文以各国(地区)各部门数智完全投入与就业工作小时数之比作为“小时数智完全投入”指标,其变化率记为 $d_{nit}^{Dighour}$;其中,就业工作小时数据来自格罗宁根大学的世界投入产出社会经济账户(WIOD-SEA)、KLEMS 数据库。计算机与电子和光学设备业涵盖传感器、通信模块等关键技术硬件,信息与通信业则提供算法支持与数据平台,共同构成数智化的“技术工具层”(Porter et al., 2014)。因此,本文将前者界定为“数智化制造业投入部门”,后者界定为“数智化服务业投入部门”。据此,对 ADB-MIRO 原始数据进行跨国、跨部门压缩,得到 2007—2022 年 44 个国家(地区)、22 个部门数智完全投入数据^④。再根据式(13)测算各国各部门数智完全依赖度(d_{nit}^{DR})。对少数年份缺失 KLEMS 数据,本文采用分国家(地区)分部门时间序列趋势

① 具体图示参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 这种冲击反映了技术进步特定形式,生产机器人、更高效自动化设备、软件等(数智化产品)的成本(因芯片技术突破、AI 算法进步等)显著降低,这本身是模型外部发生的技术进步过程(Artuc et al., 2023)。

③ 产出乘数与部门价格间理论关系及图示参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

④ 数智化(投入)制造部门,即计算机与电子和光学设备业对应 WIOD-SEA 表 56 个部门中的计算机、电子和光学产品制造和光学设备制造,也对应 ADB-MIRO 表 35 个部门中的电子与光学设备;数智化(投入)服务部门,即信息与通信对应 WIOD-SEA 表 56 个部门中的计算机编程与信息服务等活动,也对应 ADB-MIRO 表 35 个部门中的邮电和通信。

预测法进行补充。

(2)数智化职业替代率计算。根据美国统计局发布的 2000 年职业与部门对照表,本文将各类职业归入 21 个部门,并参考 Frey and Osborne(2017)、Artuc et al.(2023)提供的 2010 年与 2018 年职业的计算机化、数字化和自动化替代率,匹配后得出各部门的数智化职业替代率。为与部门数据保持一致,进一步计算了各大类部门的替代率均值^①。本文发现:随着数智化职业替代率的上升,各部门的小时数智完全投入总体呈上升趋势,尤其在计算机与电子光学设备、煤炭与石油冶炼、电力与供水、交通设备制造、其他制造、信息与通信等部门,数智完全投入水平较高,表明其数智化程度显著;各经济体层面,数智化职业替代率与小时数智完全投入之间呈微弱上升趋势。

(3)出口国内增加值变化率。基于亚洲开发银行的全球价值链指标数据库(ADB-GVC-Indicators),提取 44 个国家(地区)分部门的出口国内增加值数据,将原 35 个部门合并为前述 22 个部门,据此计算出口国内增加值变化率 d_{nit}^{DVA} 。为控制遗漏变量偏误,本文同时收集了劳动补偿、资本补偿、就业人数、资本存量、总产出、总增加值、中间投入、就业补偿等控制变量数据,来源包括格罗宁根大学的 WIOD_SEA 和全球增长与生产率研究联盟下的 KLEMS 项目。采用分国家(地区)和分部门的时间序列趋势预测法补足少数缺失年份,关税数据则来自世界银行世界综合贸易解决方案(WITS)数据库。

3.局部均衡分析:数智化对价值链贸易的影响分析

下面从简约式估计的角度,分析数智化对全球主要经济体价值链贸易影响的估计结果。^②表 1 第(1)、(2)列结果显示,小时数智完全投入变化率 d_{nit}^{DVA} 的增长促进了出口国内增加值变化率 d_{nit}^{DVA}

表 1 数智化投入变化对出口国内增加值变化的影响:基准回归

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
	<i>ols</i>				<i>Bartik_IV1</i>		<i>Bartik_IV2</i>	
	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}
d_{nit}^{DVA}	0.6590** (0.3202)	0.6553** (0.3153)			0.5176*** (0.1074)		0.5356*** (0.0987)	
d_{nit}^{DR}			0.5971* (0.3141)	0.6028* (0.3098)		2.0652* (1.1136)		2.2508* (1.1828)
控制变量	否	是	否	是	是	是	是	是
K LM					8.209***	28.525***	6.674***	28.648***
C-DWald F 值					34.697	10.100	35.146	9.388
阶段 1 adj. R ²					0.0495	0.3828	0.0495	0.3823
部门固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
地区固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是	是	是
样本量	13877	13877	14171	14171	13877	14171	13877	14171
阶段 2 F 值	4.2348	0.9990	3.6127	1.2894	4.1817	1.2520	4.9308	1.2564
Prob>F	0.0404	0.4440	0.0582	0.2350	0.0000	0.2569	0.0000	0.2543

注:***、**、*分别表示在 1%、5%、10% 的水平上显著,括号内为系数标准误;回归系数标准误双向聚类到部门一年份层面,以下各表同。

① 计算结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 所有表格的完整结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

的增长;第(3)、(4)列结果显示,数智完全依赖度变化率 d_{nit}^{DR} 的增长同样促进了 d_{nit}^{DVA} 的增长。为解决内生性问题,本文构建两个 Bartik 工具变量 $Bartik_IV1$ 和 $Bartik_IV2$ 。 $Bartik_IV1$ 构建如下:以 2007 年各国(地区)各部门在全球各部门的数智完全投入份额衡量数智化差异特征;以 2008—2022 年各国(地区)各部门的数智完全投入年度变化率衡量数智化冲击;份额和冲击的内积构成该工具变量(IV)。由于回归样本时间范围设定在 2008—2022 年,2007 年的基期数智完全投入份额不会直接影响 2008—2022 年间 d_{nit}^{DVA} ,其与核心解释变量相关,满足相关性假设。数智化投入变化率也是相当外生的冲击,而份额和冲击的内积与残差之间也会因份额与残差的不相关性而呈现正交关系,因此,该 IV 较为合理。在 $Bartik_IV1$ 的基础上,左乘 2010 年数智化产品职业替代率,形成 $Bartik_IV2$,以进一步反映各国(地区)各部门随时间不变的数智化特征。由于份额部分与误差项不相关,该 IV 也满足正交性,可作为较稳健的 IV。

表 1 第(5)、(7)列结果显示, $d_{nit}^{Digihour}$ 在 IV 估计中仍对 d_{nit}^{DVA} 有显著正向影响,估计系数略低于 OLS 结果(见第(1)、(2)列)。第(6)、(8)列结果显示, d_{nit}^{DR} 对 d_{nit}^{DVA} 的影响在 IV 估计中更为显著,估计系数高于 OLS 结果(见第(3)、(4)列),表明 OLS 可能低估其实际效应。此外,第(5)—(8)列中, Kleibergen-Paap rk LM(K-LM)统计量在 1% 显著性水平上拒绝“识别不足”原假设;第(5)、(7)列中 Cragg-Donald Wald F(C-D Wald F)统计量高于 10% 临界值,表明对 $d_{nit}^{Digihour}$ 而言,不存在弱 IV 问题。因此,后续识别更多使用其与 IV 的组合。 $Bartik_IV1$ 、 $Bartik_IV2$ 的 C-D Wald F 值及阶段 1 adj. R^2 均较小,说明它们是相对合理的 IV。综上,表 1 结果从局部均衡角度支持假说 2,即数智化投入对价值链贸易具有促进作用。

表 2 考察了小时数智完全投入变化对欧盟(EU)、RCEP 主要国家(MRCEP)^①、北美自贸区(NAFTA)价值链贸易的影响。根据第(2)、(5)列可知, $d_{nit}^{Digihour}$ 的增长促进了 MRCEP 的 d_{nit}^{DVA} 增长。

表 2 小时数智完全投入变化对出口国内增加值变化的影响:三大区域一体化组织

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>Bartik_IV1</i>			<i>Bartik_IV2</i>		
	EU	MRCEP	NAFTA	EU	MRCEP	NAFTA
	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}
$d_{nit}^{Digihour}$	0.8170 (1.0940)	0.5167*** (0.0916)	0.5917 (1.1487)	0.8150 (0.8398)	0.5175*** (0.0972)	1.0547 (1.1767)
控制变量	是	是	是	是	是	是
部门固定效应	是	是	是	是	是	是
国家(地区)固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
样本量	9008	1620	975	9008	1620	975
阶段 2 F 值	1.9269	3.9500	4.1830	1.9323	3.6467	3.5421
Prob>F	0.0409	0.0000	0.0000	0.0402	0.0001	0.0002

① MRCEP 主要国家包括中国、日本、韩国、澳大利亚和印度尼西亚。

表3考察数智完全依赖度变化对EU、MRCEP、NAFTA价值链贸易的影响。由第(2)、(5)列可见, d_{nit}^{DR} 的增长促进了MRCEP国家出口国内增加值变化率的增长。

表3 数智完全依赖度变化对出口国内增加值变化的影响:三大区域一体化组织

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
	<i>Bartik_IV1</i>			<i>Bartik_IV2</i>		
	EU	MRCEP	NAFTA	EU	MRCEP	NAFTA
	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}	d_{nit}^{DVA}
d_{nit}^{DR}	-0.1128 (3.8656)	1.8891* (1.0372)	1.1560 (2.7585)	0.3733 (3.6989)	1.9664* (1.1913)	2.0644 (3.2127)
控制变量	是	是	是	是	是	是
部门固定效应	是	是	是	是	是	是
国家/地区固定效应	是	是	是	是	是	是
年份固定效应	是	是	是	是	是	是
样本量	9222	1650	990	9222	1650	990
阶段2 F 值	1.1167	0.8970	2.3469	1.1603	0.8450	1.1635
Prob>F	0.3487	0.5362	0.0110	0.3170	0.5855	0.3147

4.局部均衡分析:GPN结构在数智化对价值链贸易影响过程中的调节效应

数智化产品价格下降能够提升出口国内增加值,增强网络连接性并提高中心性。然而,不同经济体所受益的边际影响可能存在显著差异。此种差异可能是由GPN结构特征的调节效应所导致。为此,本文基于式(20),设定如下回归模型来识别调节效应:

$$d_{nit}^{DVA} = \beta_1 d_{nit}^{DI} \times GPN10_{n,t-1} + \beta_w \sum_{w=2}^{10} C_{nit} + \mu_n + \mu_i + \mu_t + \varepsilon_{nit} \quad (21)$$

其中, $GPN10_{n,t-1}$ 表示滞后一期、价值链贸易阈值为10亿美元下的GPN结构指标,包括度中心性 $Deg10$ 、入度中心性 $inDeg10$ 、出度中心性 $outDeg10$ 、中介中心性 $beDeg10$ 等,作为调节变量。其余设定与式(20)一致。

为缓解内生性问题,本文构建了两组Bartik式工具变量 *Bartik_IV3* 和 *Bartik_IV4*。例如, *Bartik_IV3* - 1由2007年各经济体在10亿美元贸易阈值下的 $Deg10_{2007}$ (衡量GPN结构)与2008—2021年 $d_{nit}^{Dighour}$ 的乘积构成; *Bartik_IV4* - 1则是在此基础上左乘2010年数智化职业替代率,以反映不随时间变化的数智化特征。类比构建,以 $inDeg10_{2007}$ 、 $outDeg10_{2007}$ 、 $beDeg10_{2007}$ 分别与 $d_{nit}^{Dighour}$ 构成 *Bartik_IV3* - 2、*Bartik_IV3* - 3、*Bartik_IV3* - 4,以及其与职业替代率交互后的 *Bartik_IV4* - 2、*Bartik_IV4* - 3、*Bartik_IV4* - 4。同样地,采用相同方式,构建价值链贸易额为1亿美元和5亿美元阈值下的GPN结构调节模型,形成四组对应的Bartik式工具变量: *Bartik_IV5*、*Bartik_IV6*、*Bartik_IV7*、*Bartik_IV8*。

基于10亿美元阈值构建的 *Bartik_IV3* 组的估计与检验结果显示, $d_{nit}^{Dighour}$ 对 d_{nit}^{DVA} 的影响受到GPN结构的显著正向调节,而 d_{nit}^{DR} 的边际影响未受到GPN结构的显著调节。同样地,基于10亿美元阈值构建的 *Bartik_IV4* 组的估计与检验结果与 *Bartik_IV3* 组一致,在 $d_{nit}^{Dighour}$ 影响 d_{nit}^{DVA} 的过程中,GPN结构特征的调节效应显著为正;在 d_{nit}^{DR} 影响 d_{nit}^{DVA} 的过程中,GPN结构特征的调节效

应并不显著。上述识别与低阈值(1亿美元和5亿美元)下识别出的网络结构调节效应基本一致^①。

为检验 GPN 调节效应在不同国家样本中的异质性,本文选取具有代表性的区域开展分析。基于 10 亿美元阈值构建的 *Bartik_IV3* 组的分区域估计与检验结果显示,在 $d_{nit}^{Dighour}$ 影响 MRCEP 的 d_{nit}^{DVA} 过程中,GPN 结构呈现显著正向调节效应;而对于 EU,该调节效应则不显著;基于 10 亿美元阈值构建的 *Bartik_IV4* 组的分区域估计与检验结果与 *Bartik_IV3* 组的一致,上述分区域识别与低阈值下识别的网络结构调节效应结果基本一致^②。基于 10 亿美元阈值构建的 *Bartik_IV3* 组的分国家(地区)估计与检验结果显示,在 $d_{nit}^{Dighour}$ 影响中国 d_{nit}^{DVA} 的过程中,GPN 结构表现出显著的正向调节效应;而在影响美国 d_{nit}^{DVA} 的过程中,GPN 结构的调节效应则不显著;基于 10 亿美元阈值构建的 *Bartik_IV4* 组的分国家(地区)估计与检验结果与 *Bartik_IV3* 组的一致,上述分国家(地区)识别与在价值链贸易阈值设为 1 亿美元和 5 亿美元时对中国和美国生产网络结构调节效应的识别结果基本一致^③。仅在采用 *Bartik_IV4*、*Bartik_IV6* 和 *Bartik_IV8* 三组工具变量时,德国在 10 亿美元、1 亿美元和 5 亿美元的价值链贸易阈值下的 GPN 结构调节效应被识别出来;韩国在上述三个价值链贸易阈值下的 GPN 结构调节效应也得到识别^④。综上,实证结果支持假说 7。

六、反事实分析

本部分通过反事实模拟,评估数智化产品价格下降对价值链贸易、实际工资和全球生产网络的影响。本文构建的全球生产网络基于出口国内增加值矩阵,具有向加权特征,既体现贸易方向,也衡量连接强度;采用模拟矩估计法校准模型参数,并基于 ADB-MIRO 表分解双边出口额中的最终品与中间品部分;以人均 GDP 近似衡量人均工资;利用悉尼大学 Eora 数据库计算 44 个国家(地区)的出口国内增加值与出口国内增加值率。本文重点分析中国、美国、德国、日本四国及 EU 与 MRCEP 区域,探讨 w_A 下降对价值链与网络结构的影响。模拟以 2014 年为基期,设定当年 w_A 为 700 美元,外生冲击为 w_A 逐步下降^⑤,最终降至初始值的 90%^⑥。模拟采用精确帽子代数算法求解宏观均衡(Dekle et al., 2007;毛海涛等,2024)。^⑦

1. 模拟矩估计校准深层参数

这里以 2010 年制造业的数智化替代率作为贸易品部门(制造业部门)的数智化前沿初值,并以 2010 年服务业与建筑业的数智化替代率作为非贸易品部门(服务业部门)的数智化前沿初值^⑧。其

① IV 与阈值组合的识别结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

② 其他分区域的识别结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

③ 关于中国、美国分阈值的识别结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

④ 其他部分分国家(地区)的识别结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

⑤ 根据式(15)可知,数智化产品价格(w_A)变动引起 i 部门复合产品价格(P_i^{mi})相应调整。 w_A 下降被视为特定形式“技术进步”,由模型外现实因素驱动,如 AI 算法突破或材料成本下降等。这一设定类似于 DSGE 模型中的技术冲击(陈彦斌等,2019),也与贸易模型中将机器人价格下降作为外生变量的做法一致(Artuc et al., 2023)。

⑥ w_A 变化与生产率参数(ϕ_A)变化对 φ 的影响是相同的。因此,本文不单独对数智化生产率变化(即 ϕ_A 的变化)进行模拟,因为其影响是完全相同的。参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

⑦ 本部分所有反事实结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

⑧ 具体结果参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

他参数的初值均参考 Caliendo and Parro(2015)、Artuc et al.(2023)的研究。基于式(2)一式(11),采用模拟矩估计校准后得到深层参数值,如表4所示^①。可以发现,校准值与初始值差距较小。例如,贸易弹性从初始值4下降至3,降幅为25%;数智化替代弹性参数由9.0000微调至9.0046,仅变动0.0046。这一校准结果为后续模拟与政策分析提供更稳健的参数基础。

表4 深层参数的初值与校准值

参数名	数智化前沿(K^i)	数智化替代弹性参数(v)	贸易弹性(θ)	价格和成本乘数(ψ_s^i)
初值	0.5982,0.4219	9.0000	4.0000	1,2,4
校准值	0.5000	9.0046	3.0000	2.0289

2.数智化产品价格下降对价值链贸易的冲击

出口国内增加值反映一国全球价值链分工地位,被称为价值链贸易(潘文卿等,2015)。

(1) w_A 下降对中国与美国、MRCEP与EU出口国内增加值贸易的冲击。根据图1(a)、(b)可知,随着 w_A 持续下降,中国、美国、MRCEP、EU及世界其他经济体的总出口均呈现增长趋势。然

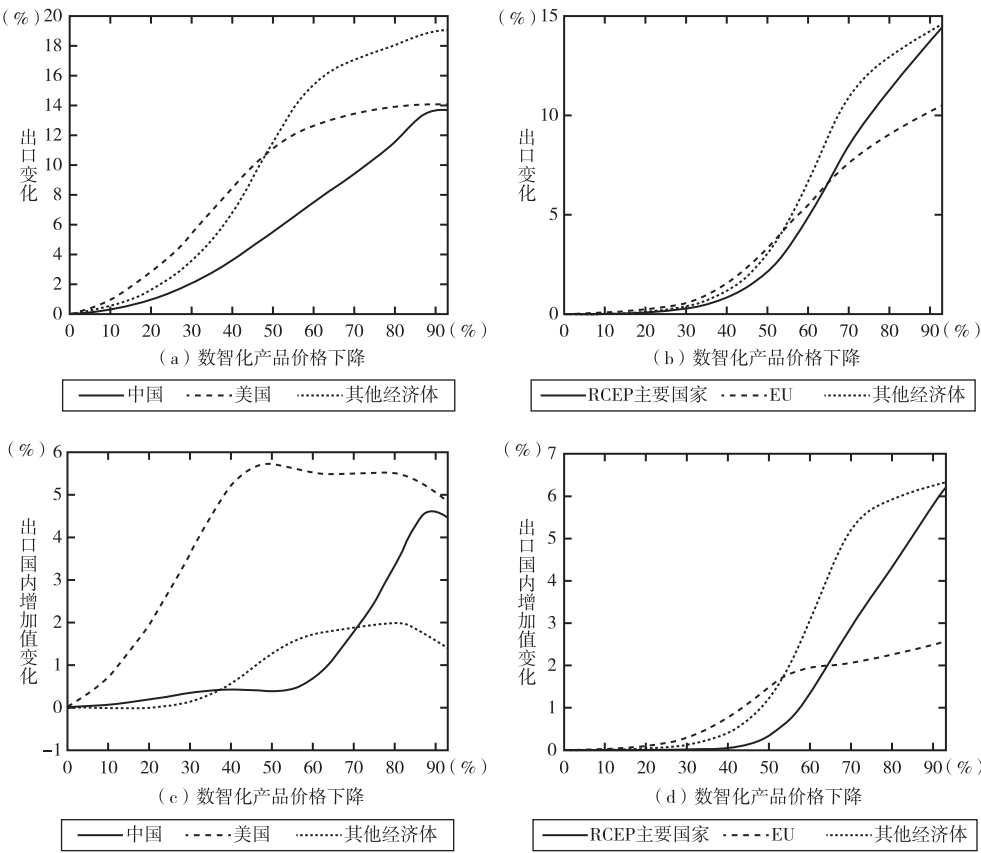


图1 w_A 下降对中国、美国、MRCEP、EU出口和出口国内增加值的影响

注:每个子图的其他经济体所指范围都不一样,在子图(a)中是指中国、美国之外其他主要经济体。本部分其他图表参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

^① 校准步骤描述参见《中国工业经济》网站(ciejournal.ajcass.com)附件。

而,当 w_A 下降至90%时,中国、美国的总出口增速明显放缓。从图1(c)可见, w_A 降至60%之前,中国的出口国内增加值呈现缓慢波动式增长; w_A 降至87%之前增长速度加快,但接近90%时增速略有放缓。美国的出口国内增加值在 w_A 降至50%前增长较快,随 w_A 降至50%—90%期间,增长率出现波动下降,但仍维持在约5%的水平。除中美以外的世界其他地区, w_A 降至80%前增长缓慢,之后增速略有回落,但仍维持在1%以上。图1(d)显示, w_A 降至40%后,MRCEP的出口国内增加值迅速增长; w_A 降至10%后,EU的出口国内增加值开始呈现缓慢波动式增长。 w_A 降至20%—70%区间,EU与MRCEP以外的其他地区增长较快,之后增长趋势趋于平缓。这验证了假说1和假说2。

(2) w_A 下降对中国与美国、MRCEP与EU之间出口国内增加值贸易的冲击。反事实模拟显示,中国对美出口国内增加值的波动趋势与MRCEP对EU的情况略相似,反映了中国作为MRCEP最大出口国,与美欧这两大贸易伙伴的结构性关联;美国对中国的总出口国内增加值和中间品出口均持续上升,表明美国在中间品与最终品两方面均显著受益。这支持了假说2。

3. 数智化产品价格冲击与人均数智产品使用、就业和工资

(1) w_A 下降对工人人均数智产品使用的影响。反事实模拟结果显示,随着 w_A 下降,各区域贸易大国工人人均数智产品使用量增加,但不同地区对价格下降的反应速度存在显著差异。总之,人均数智产品使用量在 w_A 降至约50%后趋于稳定,说明 w_A 因素对人均数智产品使用增长的边际推动作用逐步减弱。

(2) w_A 下降对工人数量的影响。反事实模拟结果显示, w_A 初步下降时,多数国家的工人数量大幅减少,最大降幅达37.5%,但不同国家对 w_A 变动的敏感度与调整节奏存在显著差异。总之, w_A 下降对就业表现出“先冲击、后调整”的特征。不同国家的调整路径受到其产业结构、数智化水平与劳动力市场弹性的影响。随着AGI深入生产环节,就业结构正从“替代—互补”向“人机协同”演化,中高技能岗位的再配置将在未来发挥关键作用。

(3) w_A 下降对区域贸易大国实际工资的影响。反事实模拟结果显示, w_A 下降对实际工资的影响在不同国家间差异显著。总体而言,只有当 w_A 降幅达到一定程度后,才会对各国工资水平产生明显作用,调整路径也受经济结构、劳动力市场特点和数智化普及程度影响;美国在 w_A 降至65%后、欧盟在降至75%后都出现迅速上升,或因高技能岗位需求增加所致。中国工资对 w_A 变化反应更滞后,或因庞大劳动力供给削弱了工资弹性。 w_A 下降带来就业与工资双重调整,短期冲击集中于低技能岗位,长期则依赖技能升级与结构转型。这验证了假说3。

4. 数智化产品价格冲击与全球生产网络型态、强度与结构

(1) w_A 下降冲击下的生产网络型态。为模拟 w_A 不变及下降30%、50%、70%情形下的全球生产网络变化,本文参考Zhou et al.(2016)的方法绘制了以最终出口国内增加值(DVAF)为权重的有向加权图,对三组生产网络型态做了对比。结果显示, w_A 持续下降推动多数经济体的DVAF增长,尤其是第二梯队国家获得了一定的扩张机会;全球生产网络的核心结构始终稳定在中国、美国、德国、日本“四足鼎立”的格局。四国分别形成以自身为中心的区域性网络。

(2) w_A 下降对全球生产网络的份额强度和增长强度的影响。在 w_A 下降50%情景下,中国、美国、日本等国家的DVAF份额降幅均不超过2.7%,而多数中小经济体及德国、法国、英国、意大利等国则实现不超过3.1%的增长;全球主要经济体的DVAF增长率均超过1.6%,但不超过7.6%;其中,中小经济体的DVAF增长幅度相对更大。在 w_A 下降50%情景下,中国、美国、日本的最终进口国外增加值(FVAF)份额降幅均不超过1.6%,而多数中小经济体及德国、法国、英国、意大利等国则实现不

超 1.9% 的增长;全球主要经济体的 FVAF 增长率均超 2.7%,但不超过 6.4%,其中大部分经济体的 FVAF 增长幅度超过 5%。这进一步验证了假说 4。

(3)全球生产网络结构特征分析。反事实模拟结果显示, w_A 下降推动全球生产网络从稀疏走向稠密、从松散走向协作,增强了网络韧性,验证了假说 5。 w_A 下降强化了核心经济体(如德国)的主导地位,而对外围国家影响有限,全球生产网络结构呈现出集中化、连接性增强的趋势,支持了假说 6。

七、结论与启示

本文构建了一个多国多部门结构估计模型,融合数智化、价值链贸易与全球生产网络机制,模拟分析了数智化产品价格下降的影响机制,并运用 Bartik 工具变量,识别了数智化对价值链贸易的影响。主要结论如下:①数智化普遍推动出口增长,并引发价值链贸易扩大效应。②数智化在促进价值链贸易过程中,全球生产网络发挥了调节效应,但这一作用在不同国家(地区)间表现出明显的异质性。③工人人均数智产品使用量提升,人机协同成为趋势。随着 AGI 任务泛化能力增强,未来任务分配边界将进一步拓展。④数智化对工人数量具有阈值效应:降至 50%—60% 以前,工人被替代明显;在此之后,高技能工人需求增加,工人数量企稳甚至回升。⑤数智化对实际工资的影响存在阈值:初期工资下降,超过临界点后,高技能工人占比上升,提高整体工资水平,阈值在中国等劳动力供给充足国家更高。⑥区域贸易大国与其他经济体在数智化进程中差距扩大。中国、美国、德国、日本等国家获益更多。⑦在数智化产品价格下降 50% 情境下,德国可能超越中国,成为全球 DVAF 份额最高的国家。全球主要经济体 DVAF 增长 1.6%—7.6%,中小国家增幅更大。⑧在同一情境下,中国、美国、日本的 FVAF 份额下降不超 1.6%,德国、法国、英国、意大利等国上升不超 1.9%,全球多数国家 FVAF 增长超 5%。⑨数智化产品价格下降推动全球生产网络更稠密、更互联,并增强网络韧性和价值链互惠性,网络连接结构显著优化。⑩网络结构优化和集中化趋势增强,且对数智化发展的贸易促进作用具有正向调节效应。网络越稠密、中心性越高的经济体,越能获益于数智化带来的连接性提升。

基于研究结论,本文得到以下启示:一是强化数智化技术创新,提升生产率与国际竞争力。根据 2024 年中央经济工作会议精神,推进“人工智能+”行动,加快传统产业数智化升级。加强科研机构、高校与企业协同,聚焦人工智能、大数据、云计算等核心技术,推动关键技术突破。二是实施数智化教育战略,培养复合型高技能人才。推动人工智能、大数据等课程进校园,融入职业教育和终身学习体系。建立技能认证机制,增强劳动者对智能技术的适应力与竞争力。三是深化国际合作,化解贸易壁垒。依托与欧盟、日本、美国等贸易伙伴的合作基础,拓展数智技术领域双边合作。鼓励企业“走出去”,在海外设厂,扩大电动车及零部件出口,规避反补贴与关税壁垒。四是推进“数字丝绸之路”建设,缩小全球数字鸿沟。推动共建国家在信息基础设施、智能制造、数字供应链等领域的数智项目落地,带动数字经济转型。重点支持“中国—东盟信息港”“数字中欧班列”等项目,推进多语言数据共享与跨境平台互联。五是加强区域价值链协同,提升全球网络连接能力。深化中国与欧盟的经贸关系,支持企业参与 RCEP、非洲、拉丁美洲及“一带一路”共建国家的价值链融合。鼓励企业嵌入全球核心节点,提升网络中心性与互联性,增强数智化带来的价值链贸易扩大效应。

〔参考文献〕

- 〔1〕陈彦斌,林晨,陈小亮.人工智能,老龄化与经济增长[J].经济研究,2019,(7):47-63.
- 〔2〕胡翠,王宁.工业机器人与全球生产网络演化——基于量化结构模型方法的研究[J].中国工业经济,2024,(1):93-111.
- 〔3〕吕越,谷玮,包群.人工智能与中国企业参与全球价值链分工[J].中国工业经济,2020,(5):80-98.
- 〔4〕毛海涛,杨灿宇,张洁.工业机器人、投入产出关联与消费者福利——基于开放框架的量化分析[J].数量经济技术经济研究,2024,(6):46-66.
- 〔5〕潘文卿,娄莹,李宏彬.价值链贸易与经济周期的联动:国际规律及中国经验[J].经济研究,2015,(11):20-33.
- 〔6〕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,(7):60-79.
- 〔7〕Acemoglu, D., and P. Restrepo. Robots and Jobs: Evidence from US Labor Markets[J]. Journal of Political Economy, 2020, 128(6):2188-2244.
- 〔8〕Artuc, E., P. Bastos, and B. Rijkers. Robots, Tasks, and Trade[J]. Journal of International Economics, <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2023.103828>, 2023.
- 〔9〕Caliendo, L., and F. Parro. Estimates of the Trade and Welfare Effect of NAFTA[J]. Review of Economic Studies, 2015, 8(1):1-14.
- 〔10〕Cerina, F., Z. Zhu, A. Chessa, and M. Riccaboni. World Input-Output Network[J]. Plos One, 2015, 10(7):1-24.
- 〔11〕Christensen, H., N. Amato, H. Yanco, H. Mataric, and M. G. Sukhatme. A Roadmap for US Robotics—From Internet to Robotics 2020 Edition[R]. Foundations and Trends in Robotics, 2021, 8(4):307-424.
- 〔12〕Dekle, R., J. Eaton, and S. Kortum. Unbalanced Trade[J]. American Economic Review, 2007, 97(2):351-355.
- 〔13〕Eaton, J., S. Kortum, and F. Kramarz. An Anatomy of International Trade: Evidence from French Firms[J]. Econometrica, 2011, 79(5):1453-1498.
- 〔14〕Frey, C. B., and M. A. Osborne. The Future of Employment: How Susceptible Are Jobs to Computerisation[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2017, 114:254-280.
- 〔15〕Koopman, R., Z. Wang, and S. J. Wei. Tracing Value-added and Double Counting in Gross Exports[J]. American Economic Review, 2014, 104(2):459-494.
- 〔16〕McNerney, J., C. Savoie, F. Caravelli, V. M. Carvalho, and J. D. Farmer. How Production Networks Amplify Economic Growth[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2106031118>, 2022.
- 〔17〕Plötz, T., and G. A. Fink. Markov Models for Offline Handwriting Recognition: A Survey[J]. International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR), 2009, 12:269-298.
- 〔18〕Porter, M. E., and J. E. Heppelmann. How Smart, Connected Products Are Transforming Companies[J]. Harvard Business Review, 2014, 92(1-2):24-24.
- 〔19〕Serrano, M. Á., M. Boguñá, and A. Vespignani. Patterns of Dominant Flows in the World Trade Web[J]. Journal of Economic Interaction & Coordination, 2007, 2(2):111-124.
- 〔20〕Zang, J., H. Y. Ji, and Q. X. Huang. Empowering Traditional Industries with Digital Intelligence for Transformation and Upgrading[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(7):1183-1190.
- 〔21〕Zhou, M., G. Wu, and H. Xu. Structure and Formation of Top Networks in International Trade[J]. Social Networks, 2016, 44:9-21.

Digital Intelligentization, Value Chain Trade and Global Production Networks

XIE Jie, LU Dong-zi, LIU Yan-ping, CHEN Fei-fei

(School of Economics, Zhejiang Gongshang University)

Abstract: Digital intelligentization (DI) technologies, including big data algorithms, generative artificial intelligence (AI), and mobile robotics, are rapidly replacing massive non-routine tasks, accelerating the DI transformation of the service sector and deepening its integration with manufacturing. This transformation is profoundly reshaping the structure of global production networks (GPN). As the boundaries between manufacturing and services become increasingly blurred and human-machine collaboration becomes ubiquitous, DI technologies are emerging as a key driver of global value chain (GVC) upgrading. However, existing research in this area remains limited. Classical models typically assume homogeneous diffusion of technological shocks and overlook the moderating role of production network topology in technological spillovers. Existing production network theories fail to treat DI advancements as exogenous technology supply shocks, and relevant literature primarily focuses on the isolated effects of either network expansion or industrial robotics.

This paper investigates how DI technologies reshape the structure of GPN by reducing relative production costs and promoting value chain trade. This paper develops a multi-country, multi-sector structural estimation model and conducts counterfactual simulations based on exogenous declines in DI product prices to evaluate their potential impact on value chain trade and GPN' evolution. The model draws on key data sources including the ADB-MIRO global input-output tables, the WIOD Social-Economic Accounts (WIOD-SEA), and the KLEMS database. In the reduced-form analysis, this paper employs Bartik instrumental variables to identify the impact of DI investment changes on value chain trade, while examining the moderating effects of the structure of GPN.

The marginal contributions of this paper are as follows. First, this paper conceptually distinguishes between “automation” and “DI transformation” and defines sectors such as computer, electronic, optical equipment, and information and communications as DI-intensive sectors, providing a classification basis for input-output network-based structural identification. Second, this paper constructs a model that incorporates the assignment of production tasks and DI interactions to analyze how these affect GPN via value chain trade. Third, this paper reveals the moderating role of the structure of GPN in the diffusion of DI effects. Fourth, this paper systematically examines the deep mechanisms through which DI reshapes GPN across dimensions such as value chain trade, network density and centrality, employment, and wages. Fifth, this paper develops a structural estimation framework nested within a multi-country, multi-sector general equilibrium model to identify the impact of DI technologies on value chain trade and GPN evolution, enabling counterfactual simulations and policy evaluation.

Our findings suggest that DI technologies broadly promote value chain trade, with more pronounced effects in countries with higher network density, reciprocity, and centrality. At the employment and wage level, DI exhibits significant threshold effects, with higher response thresholds in labor-abundant economies. Moreover, DI accelerates the evolution of GPN toward greater density, resilience, and concentration, reinforcing the connectivity and centrality of core economies. Empirical tests confirm that the structure of GPN positively moderates the marginal impact of DI technologies. Based on these findings, this paper proposes the following policy implications: ① We should strengthen DI technology innovation to enhance productivity and global competitiveness; ② We should implement DI-oriented education strategies to develop versatile, high-skilled talent; ③ We should deepen international cooperation to mitigate trade barriers; ④ We should advance the “Digital Silk Road” Initiative to narrow the global digital divide; ⑤ We should enhance regional value chain coordination to improve the connectivity of GPN. The theoretical and quantitative insights in this paper offer a systematic understanding of how DI technologies reshape value chain flows, employment structures, and GPN, providing a foundation for informed policy-making.

Keywords: digital intelligentization; value chain trade; global production network; structural estimation model; counterfactual simulation

JEL Classification: E17 F17 L86

[责任编辑:覃毅]