

人工智能知识溢出、研发资源配置与中国经济增长 ——基于多国多部门贸易模型的量化研究

摘 要：本文构建包含人工智能（AI）中间投入、跨部门知识溢出和资本积累的多国多部门动态贸易模型，利用 2012—2022 年数据估计并校准模型，考察中国研发资源向 AI 部门再配置的宏观效应。结果显示，AI 知识存量与非 AI 部门知识增长正相关；研发再配置具有“短期调整成本、长期累积收益”的动态特征，贸易成本上升会延缓中期收益，投资率下降则削弱资本深化效应。研究表明，AI 研发政策应兼顾部门间创新能力、知识扩散与开放环境。

关键词：人工智能；创新与知识溢出；国际贸易

AI Knowledge Spillovers, R&D Resource Allocation, and Economic Growth in China: A Quantitative Multi-Country, Multi-Sector Trade Analysis

Abstract: This paper develops a dynamic multi-country, multi-sector trade model featuring AI intermediate inputs, cross-sector knowledge spillovers, and capital accumulation. Using data for 2012 – 2022, we estimate and calibrate the model to quantify the macroeconomic effects of reallocating China’s R&D resources toward AI. AI knowledge is positively associated with knowledge growth in non-AI sectors. R&D reallocation entails short-run adjustment costs but generates long-run level gains through knowledge accumulation and diffusion. Higher trade costs delay medium-run gains, while lower investment weakens capital deepening. The findings underscore the importance of balancing innovation across sectors, knowledge diffusion, and economic openness.

Keywords: Artificial Intelligence (AI); Innovation and Knowledge Spillovers; International Trade

JEL Classification: F11; O33; O41

一、 引言

近年来，人工智能（Artificial Intelligence，以下简称 AI）正在由单一的自动化工具演变为嵌入生产网络、参与知识创造的通用目的技术，中国相应的政策重点也由技术示范逐步转向规模化应用与跨部门协同。2022 年，科技部等六部门印发《关于加快场景创新以人工智能高水平应用促进经济高质量发展的指导意见》，提出以应用需求牵引技术迭代和产业化，并通过开放制造、农业、物流、金融和科学研究等领域的应用场景推动人工智能扩散。2025 年，国务院印发《关于深入实施“人工智能+”行动的意见》，进一步将科学技术、产业发展、消费提质、民生福祉、治理能力和全球合作纳入统一的行

动框架，同时强调数据、算力、人才、开源生态和金融财政支持等基础条件。这一政策演进表明，AI 的经济影响并非来自某项技术在单一部门中的孤立应用，而取决于其能否与研发活动、应用场景和产业链上下游形成持续互动。已有研究也揭示了 AI 的通用目的技术属性及其跨部门扩散特征：郭凯明（2019）将 AI 刻画为能够进入不同部门生产过程的通用型中间投入，程文（2021）则指出，AI 的生产率效应需要经过生产网络扩散以及互补性无形资本积累才能逐步释放。

更重要的是，AI 不仅能够作为中间投入影响当期生产，还可能通过知识重组、技术延伸和知识传播改变未来的创新效率。董直庆等（2026）基于 AI 专利文本和引文信息发现，AI 能够通过新知识重组、既有知识延伸和知识传播促进知识生成；李玉花等（2024）的企业层面证据进一步表明，AI 应用可以通过增加知识多样性、打破组织惯例和改善资源配置推动企业创新。然而，研发资源具有稀缺性，其投向还会对要素禀赋和相对成本作出内生反应，刘青和肖柏高（2023）关于劳动力成本与劳动节约型技术创新的研究为此提供了经验证据。因此，在研发资源总量给定时，增加 AI 部门的研发投入既可能因挤出其他部门创新而造成短期成本，也可能通过 AI 知识积累和跨部门溢出产生滞后但持久的长期收益。在开放经济中，贸易联系还会通过中间投入价格、市场范围和生产网络改变知识积累的回报，资本积累则进一步影响技术收益向收入和消费的传导。如何在统一框架下衡量上述短期机会成本与长期累积收益，正是评估 AI 研发资源配置及其宏观经济影响的关键问题。

为回答上述问题，本文构建一个包含投入产出关联和资本积累的多国多部门 Eaton-Kortum 动态量化模型，并将 AI 单列为生产网络中的一个部门。AI 在模型中具有双重作用：一方面，其产出作为中间投入进入各部门生产；另一方面，其知识存量能够提高本国非 AI 部门的创意到达率，从而形成跨部门知识溢出。由此，模型将研发资源配置、知识积累、部门生产、国际贸易和资本形成置于统一的动态框架之中。本文利用 2012–2022 年多国多部门的投入产出、双边贸易、专利、研发和宏观数据构造 AI 部门及其知识存量，估计相关知识生产参数并校准模型。在此基础上，本文以 2022 年为基期，在中国研发支出占增加值的比例不变的条件下，设定 2023–2032 年间将非 AI 部门研发投入的 30% 重新配置至 AI 部门、2033 年起恢复基准研发结构的反事实情景，并进一步考察贸易成本上升、劳动力供给收缩和投资率下降对研发再配置效应的影响。

本文得到以下三方面主要发现。第一，部门层面的估计结果显示，既有知识存量的估计系数约为 -0.95 至 -0.73 ，且在不同模型设定下均显著为负，表明知识创造存在边际递减。AI 知识存量对非 AI 部门知识增长率的估计系数约为 0.30 ，并在 10% 的水平上显著，为模型中的跨部门知识溢出机制提供了支持性证据。第二，在保持研发支出占增加值比例不变的条件下，阶段性地将研发资源向 AI 部门再配置会产生明显的“先降后升”效应。政策实施初期，非 AI 部门研发受到挤出，而 AI 知识形成及其扩散尚需时间，人均消费和人均收入因而下降，并于 2027 年前后达到约 1.0% 的最大降幅，随后于 2034 年前后超过基准路径。人均资本的调整更为滞后，约于 2038 年前后转为正向。到 2050 年，人均资本、人均消费和人均收入分别比基准路径高约 2.1%、4.7% 和 4.7%；到 2100 年，三者分别高约 8.4%、7.1% 和 7.0%。第三，机制关闭实验表明，模型的长期转轨路径对新增知识形成、既有知识对创新的作用、AI 跨部门知识溢出和国际贸易等机制均较

为敏感。进一步的情景分析显示，贸易成本上升会削弱研发再配置的中期边际收益；以相同贸易环境下未实施研发再配置的路径为基准时，其长期边际效应反而有所扩大，但这并不意味着提高贸易壁垒能够改善经济福利。劳动力供给收缩对研发再配置边际效应的影响相对有限，投资率下降则主要削弱技术进步通过资本深化产生的放大作用，但二者均未改变长期边际效应的正方向。

本文与三支文献紧密相关。第一支文献从通用目的技术及其扩散的视角研究 AI 的宏观经济效应。一方面，AI 可以替代部分既有任务并提高生产效率；另一方面，它也可能通过创造新任务、提升知识生产效率和扩大技术发现空间形成新的增长动力。Aghion et al. (2019) 区分了 AI 用于商品生产和用于知识生产的不同增长渠道，Acemoglu and Restrepo (2019) 则在任务框架下揭示了自动化、生产率效应和新任务创造之间的相互作用。Jones (2022) 进一步指出，AI 能否影响长期增长，取决于其是否持续进入知识生产过程以及研究生产率如何随既有知识存量变化。中文文献结合中国经济的产业结构和人口特征拓展了上述分析：郭凯明 (2019) 将 AI 刻画为能够渗透不同产业的通用型中间投入，考察其对产业结构和要素收入分配的影响；陈彦斌等 (2019) 则强调劳动替代、资本积累和全要素生产率等渠道，指出 AI 可能在一定程度上缓解人口老龄化带来的增长压力。

AI 的宏观收益并不会随着技术出现而即时实现，而是取决于技术扩散及其与组织、人才和无形资本的互补关系。Brynjolfsson et al. (2021) 从无形资本投资的角度解释了通用目的技术应用初期生产率增长放缓、随后逐渐释放收益的“生产率 J 曲线”，程文 (2021) 则从生产网络和部门扩散的角度说明了 AI 可能引致的“索洛悖论”。对于 AI 宏观效应的数量级，现有研究尚未形成一致结论：Acemoglu (2025) 基于可被 AI 有效替代的任务范围和任务层面成本节约得到相对谨慎的估计，而 Aghion and Bunel (2024) 更加强调创新、技术互补和新产品创造可能带来的增长空间。这些差异表明，AI 的宏观影响取决于研究所考虑的作用渠道、扩散速度和时间尺度。现有研究大多将 AI 技术进步或采用路径作为外生变化，并主要在单国或相对封闭的经济环境中展开，较少同时刻画 AI 知识积累、部门间扩散和国际贸易联系。本文在多国多部门贸易框架中研究 AI 扩散所产生的短期调整成本和长期经济收益，是对这一支文献的拓展。

第二支文献关注 AI 对知识生产、企业创新和知识溢出的影响。AI 不仅是一项用于生产活动的自动化技术，也可能成为服务于科学研究和技术发现的“通用发明方法” (Bianchini et al., 2022)。董直庆等 (2026) 利用 AI 专利文本和引文信息表明，AI 可以通过知识重组、知识延伸和知识传播影响新知识生成。企业层面的证据也显示，AI 应用与创新活动之间存在密切联系：Babina et al. (2024) 发现企业的 AI 投资主要通过产品创新促进销售、就业和 market 价值增长，李玉花等 (2024) 则发现，AI 应用能够通过增加知识多样性、打破组织惯例和改善资源配置促进企业创新；进一步分析表明，这一促进作用在吸收能力较强、生产率较高和人力资本较充足的企业中更为明显。Chen et al. (2024) 进一步从专利价值和后续引用出发，说明 AI 创新本身具有较高的经济价值，而且专利公开和开源技术可能推动相关知识向应用部门扩散。

与此同时，AI 能否转化为创新产出，还取决于数据可得性以及企业的吸收能力、人力资本和组织学习条件。Beraja et al. (2023) 发现，数据密集型政府项目能够促进中国

AI 企业的商业创新；Brynjolfsson et al. (2025) 表明，生成式 AI 可以帮助经验较少的劳动者学习高绩效员工的隐性知识，体现了 AI 在组织内部的知识传播作用。知识溢出还可能跨越企业边界，Zacchia (2020) 关于科研人员网络的研究表明，人员联系可以产生显著的企业间研发外部性。不过，AI 对创新数量和创新质量的影响并不必然一致，肖柏高等 (2026) 发现 AI 可以增加科研产出，但其对原创性、探索性和创新质量的影响更为复杂。总体而言，这支文献主要从企业、专利、劳动者或科研活动层面识别 AI 的创新效应，尚未将相关微观证据系统转化为多部门经济中的 AI 知识存量和跨部门溢出机制。本文估计 AI 知识存量与非 AI 部门知识增长之间的关系，为 AI 知识溢出提供了支持性证据。

第三支文献研究研发投入、技术方向和资源配置的动态效应。Jones (1995) 和 Kortum (1997) 指出，研发投入能否转化为技术进步，取决于既有知识存量、创意搜寻效率和研究生产率，研发资源增加并不必然带来同比例的创新增长。进一步地，研发活动具有明确的技术方向。刘青和肖柏高 (2023) 发现劳动力成本上升会诱导企业开展劳动节约型技术创新，黄浩权等 (2024) 区分新任务创造和既有任务自动化，说明研发资源投向不同技术方向可能产生不同的增长和分配后果。陈斌开等 (2026) 则在内生 AI 技术进步的动态一般均衡框架中比较了创新、数字基础设施和再分配政策的宏观影响。这些研究意味着，评估 AI 政策不仅需要关注研发投入总量，还需要考察有限研发资源在 AI 部门和其他部门之间的配置及其机会成本。

开放经济文献进一步揭示了贸易和跨区域联系对技术扩散与动态增长的影响。Eaton and Kortum (1999) 较早从国际技术扩散角度解释国家间生产率差异，Buera and Oberfield (2020) 和 Perla et al. (2021) 分别刻画了贸易接触、创意传播和技术选择影响长期增长的机制。Cai et al. (2022) 进一步将研发投入以及跨国、跨部门知识扩散纳入多国多部门量化贸易模型，Cai et al. (2022) 则将贸易、知识扩散以及资本和劳动力积累置于统一的空间增长框架之中。Bekkers et al. (2025) 在多部门贸易模型中将 AI 服务作为生产投入，量化了 AI 应用对贸易和长期经济表现的影响，但没有在研发资源总量约束下研究 AI 部门与非 AI 部门之间的创新资源竞争。本文进一步单列 AI 研发部门并引入其对其他部门的知识溢出，在开放经济环境下考察研发资源配置、知识积累、资本积累和贸易联系之间的动态反馈。

相对于上述三支文献，本文主要从三个方面作出拓展。第一，本文在包含投入产出联系和资本积累的多国多部门 Eaton-Kortum 模型中单列 AI 部门，同时刻画 AI 作为中间投入和知识来源的双重作用，从而将 AI 扩散、跨部门知识溢出与国际贸易纳入统一的动态框架。第二，本文结合 2012–2022 年的多国多部门数据构造 AI 部门及其知识存量，并利用部门层面的经验关系为 AI 知识溢出机制提供支持性证据，再据此量化不同机制对经济增长的贡献。第三，本文在研发投入总规模不变的条件下，将 2023–2032 年逐步把部分非 AI 部门研发资源转向 AI 部门设定为一项政策情景，并考察其与贸易成本、劳动力供给和投资率变化的交互作用。

二、理论模型

本文在包含投入产出联系和资本积累的多国多部门 Eaton–Kortum 模型中引入内生部门创新。生产与贸易模块沿用 Eaton and Kortum (2002)、Caliendo and Parro (2015) 和 Allen and Arkolakis (2014) 的设定，创新模块借鉴 Buera and Oberfield (2020) 和 Cai et al. (2022)。

模型包括生产、创新、代表性家庭与资本积累、国际贸易以及市场出清五个部分。本文将 ICT—AI 服务单列为生产网络中的一个部门：其产出作为中间投入进入各部门生产，其知识存量则提高非 AI 部门的创意到达率。各部门通过研发活动产生候选创意，候选创意以本国相应部门的既有技术前沿为基础。生产使用劳动、资本和部门中间投入；政府按照增加值的一定比例筹集研发经费；代表性家庭按照外生给定的投资率将部分增加值用于投资，进而形成下一期资本存量。

时间为离散的，以 t 表示。国家集合记为 $\mathcal{N} \equiv \{1, \dots, N\}$ ，并以 $n, i, m \in \mathcal{N}$ 表示不同国家；部门集合记为 $\mathcal{J} \equiv \{1, \dots, J\}$ ，并以 $j, k, h \in \mathcal{J}$ 表示不同部门。其中，部门 $a \equiv \text{ICT-AI Services} \in \mathcal{J}$ 表示 ICT—AI 服务部门， $\mathcal{J}_{-a} \equiv \mathcal{J} \setminus \{a\}$ 表示非 AI 部门集合。

(一) 生产

国家 n 的部门 j 由竞争性企业构成，各企业生产由 $\omega \in [0, 1]$ 索引的可贸易差异化品种。劳动和资本可在一国内跨部门流动。品种 ω 的生产函数为

$$y_{n,j,t}(\omega) = q_{n,j,t}(\omega) [L_{n,j,t}(\omega)^{\beta_{n,j}} K_{n,j,t}(\omega)^{1-\beta_{n,j}}]^{\gamma_{n,j}} \prod_{k=1}^J m_{n,j,t}^k(\omega)^{\gamma_{n,j}^k}, \quad (1)$$

其中， $\beta_{n,j} \in (0, 1)$ 表示增加值中的劳动份额， $\gamma_{n,j}$ 表示增加值占总产出的份额， $\gamma_{n,j}^k$ 表示来自部门 k 的中间投入占部门 j 总成本的份额。规模报酬不变意味着

$$\gamma_{n,j} + \sum_{k=1}^J \gamma_{n,j}^k = 1. \quad (2)$$

令 $W_{n,t}$ 和 $R_{n,t}$ 分别表示工资与资本租金率。由成本最小化可得部门 j 的单位成本

$$c_{n,j,t} = \Upsilon_{n,j} [W_{n,t}^{\beta_{n,j}} R_{n,t}^{1-\beta_{n,j}}]^{\gamma_{n,j}} \prod_{k=1}^J P_{n,k,t}^{\gamma_{n,j}^k}, \quad (3)$$

其中，

$$\Upsilon_{n,j} \equiv (\gamma_{n,j} \beta_{n,j})^{-\gamma_{n,j} \beta_{n,j}} [\gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j})]^{-\gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j})} \prod_{k=1}^J (\gamma_{n,j}^k)^{-\gamma_{n,j}^k}. \quad (4)$$

假定品种生产率服从 Fréchet 分布，即

$$F_{n,j,t}(q) \equiv \Pr(q_{n,j,t}(\omega) \leq q) = \exp(-\lambda_{n,j,t} q^{-\theta}), \quad (5)$$

其中, $\lambda_{n,j,t} > 0$ 表示国家一部门层面的知识存量, $\theta > 1$ 为控制生产率离散程度的形状参数。

(二) 创新

从 t 期到 $t+1$ 期, 部门研发产生候选创意。每个候选创意由原创性抽样值 z 与从本国既有技术前沿抽取的生产率 q' 共同构成, 其中

$$q' \sim F_{n,j,t}, \quad F_{n,j,t}(q) = \exp(-\lambda_{n,j,t} q^{-\theta}). \quad (6)$$

候选创意对应的全要素生产率为

$$\tilde{q} = z(q')^{\rho^j}, \quad \rho^j \in [0, 1), \quad (7)$$

原创性成分 z 服从帕累托分布:

$$H(z) = 1 - \left(\frac{z}{z_0}\right)^{-\theta}, \quad z \geq z_0. \quad (8)$$

令 $RD_{n,j,t}$ 表示名义研发支出, $VA_t^W \equiv \sum_m VA_{m,t}$ 表示世界 GDP, $\bar{\alpha}_{n,j,t} > 0$ 表示外生的国家一部门创新效率。有效创意的到达服从泊松过程, 其到达率取决于以世界 GDP 标准化的研发强度 $RD_{n,j,t}/VA_t^W$, 具体为

$$\alpha_{n,j,t}^R = \begin{cases} \bar{\alpha}_{n,a,t} \left(\frac{RD_{n,a,t}}{VA_t^W}\right)^{\varphi^a}, & j = a, \\ \bar{\alpha}_{n,j,t} \left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W}\right)^{\varphi^j} \lambda_{n,a,t}^{\xi^j}, & j \in \mathcal{J}_{-a}. \end{cases} \quad (9)$$

外生创新效率按照下式演化:

$$\bar{\alpha}_{n,j,t+1} = G_{\bar{\alpha},n,j} \bar{\alpha}_{n,j,t}, \quad (10)$$

其中, $G_{\bar{\alpha},n,j} > 0$ 为国家一部门特定的增长因子。本文设定 $\xi^a = 0$, 即 AI 部门知识存量不通过跨部门知识溢出渠道额外影响 AI 部门自身的创意到达率。相关参数满足

$$\varphi^j \geq 0, \quad \xi^j \geq 0, \quad \xi^a = 0. \quad (11)$$

由 Fréchet 分布的矩可得

$$\int_0^\infty x^{\rho^j \theta} dF_{n,j,t}(x) = \Gamma(1 - \rho^j) \lambda_{n,j,t}^{\rho^j}. \quad (12)$$

当 $z_0 \rightarrow 0$ 时, 最优候选创意的累积分布函数为

$$F_{n,j,t}^{\text{new}}(q) = \exp\left[-q^{-\theta} \Gamma(1 - \rho^j) \alpha_{n,j,t}^R \lambda_{n,j,t}^{\rho^j}\right]. \quad (13)$$

下一期技术前沿由既有技术蓝图与最优候选创意共同决定，其分布函数为

$$F_{n,j,t+1}(q) = F_{n,j,t}(q)F_{n,j,t}^{\text{new}}(q) \quad (14)$$

$$= \exp\left\{-q^{-\theta}\left[\lambda_{n,j,t} + \Gamma(1 - \rho^j)\alpha_{n,j,t}^R\lambda_{n,j,t}^{\rho^j}\right]\right\}. \quad (15)$$

因此，知识存量的运动方程为

$$\Delta\lambda_{n,j,t+1} \equiv \lambda_{n,j,t+1} - \lambda_{n,j,t} = \Gamma(1 - \rho^j)\alpha_{n,j,t}^R\lambda_{n,j,t}^{\rho^j}. \quad (16)$$

将式 (9) 代入式 (16)，可得

$$\Delta\lambda_{n,j,t+1} = \begin{cases} \Gamma(1 - \rho^a)\bar{\alpha}_{n,a,t}\left(\frac{RD_{n,a,t}}{VA_t^W}\right)^{\varphi^a}\lambda_{n,a,t}^{\rho^a}, & j = a, \\ \Gamma(1 - \rho^j)\bar{\alpha}_{n,j,t}\left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W}\right)^{\varphi^j}\lambda_{n,a,t}^{\xi^j}\lambda_{n,j,t}^{\rho^j}, & j \in \mathcal{J}_{-a}. \end{cases} \quad (17)$$

式 (17) 刻画了各部门知识存量的内生演化。AI 部门的知识增量 $\Delta\lambda_{n,a,t+1}$ 取决于国家一部门创新效率 $\bar{\alpha}_{n,a,t}$ 、标准化研发强度 $RD_{n,a,t}/VA_t^W$ 以及既有知识存量 $\lambda_{n,a,t}$ 。非 AI 部门除受上述部门自身因素影响外，还受 AI 部门知识存量 $\lambda_{n,a,t}$ 的影响；参数 ξ^j 刻画这一跨部门知识溢出渠道。

(三) 代表性家庭、研发、投资与资本积累

国家 n 的代表性家庭消费由各部门复合品按照 Cobb–Douglas 形式聚合：

$$C_{n,t} = \prod_{j=1}^J C_{n,j,t}^{\alpha_{n,j}^C}, \quad \alpha_{n,j}^C \geq 0, \quad \sum_{j=1}^J \alpha_{n,j}^C = 1. \quad (18)$$

与之对应的消费价格指数为

$$P_{n,t}^C = \prod_{j=1}^J \left(\frac{P_{n,j,t}}{\alpha_{n,j}^C}\right)^{\alpha_{n,j}^C}. \quad (19)$$

各部门复合品的消费支出满足

$$P_{n,j,t}C_{n,j,t} = \alpha_{n,j}^C P_{n,t}^C C_{n,t}. \quad (20)$$

总投资品同样由部门复合品按照 Cobb–Douglas 形式聚合：

$$I_{n,t} = \prod_{j=1}^J I_{n,j,t}^{\alpha_{n,j}^I}, \quad \alpha_{n,j}^I \geq 0, \quad \sum_{j=1}^J \alpha_{n,j}^I = 1, \quad (21)$$

与之对应的投资价格指数为

$$P_{n,t}^I = \prod_{j=1}^J \left(\frac{P_{n,j,t}}{\alpha_{n,j}^I}\right)^{\alpha_{n,j}^I}. \quad (22)$$

各部门复合品的投资支出满足

$$P_{n,j,t}I_{n,j,t} = \alpha_{n,j}^I P_{n,t}^I I_{n,t}. \quad (23)$$

由于消费和投资的部门构成通常不同，本文允许 $\alpha_{n,j}^C \neq \alpha_{n,j}^I$ ，从而 $P_{n,t}^C \neq P_{n,t}^I$ 。

为刻画各国净对外收支，本文引入一个在全球范围内收支平衡的转移支付池。令 $\phi_{n,t} \in [0, 1)$ 表示国家 n 按要素收入向该支付池缴纳的比例， $L_{n,t}$ 表示该国人口。支付池向各国居民提供等额的人均转移支付，其数额为

$$T_t^P \equiv \frac{\sum_{m=1}^N \phi_{m,t} (R_{m,t}K_{m,t} + W_{m,t}L_{m,t})}{\sum_{m=1}^N L_{m,t}}. \quad (24)$$

因此，国家 n 的净对外转移支付为

$$D_{n,t} = -\phi_{n,t} (R_{n,t}K_{n,t} + W_{n,t}L_{n,t}) + L_{n,t}T_t^P. \quad (25)$$

等价地，

$$\begin{aligned} D_{n,t} = & -\phi_{n,t} (R_{n,t}K_{n,t} + W_{n,t}L_{n,t}) \\ & + \frac{L_{n,t}}{\sum_{m=1}^N L_{m,t}} \sum_{m=1}^N \phi_{m,t} (R_{m,t}K_{m,t} + W_{m,t}L_{m,t}). \end{aligned} \quad (26)$$

根据上述定义，全球净转移支付加总为零，即

$$\sum_{n=1}^N D_{n,t} = 0. \quad (27)$$

国家 n 的增加值等于劳动收入与资本收入之和：

$$VA_{n,t} \equiv W_{n,t}L_{n,t} + R_{n,t}K_{n,t}. \quad (28)$$

国民收入则等于增加值与净对外转移支付之和：

$$IN_{n,t} \equiv VA_{n,t} + D_{n,t} = W_{n,t}L_{n,t} + R_{n,t}K_{n,t} + D_{n,t}. \quad (29)$$

政府按照外生给定的比例 $\tau_{n,t}^R$ 从增加值中筹集研发经费：

$$T_{n,t}^R = \tau_{n,t}^R VA_{n,t}, \quad \tau_{n,t}^R \geq 0, \quad (30)$$

研发经费按照份额 $\psi_{n,j,t}^R$ 配置到各部门，其中

$$\psi_{n,j,t}^R \geq 0, \quad \sum_{j=1}^J \psi_{n,j,t}^R = 1. \quad (31)$$

因而，部门 j 的研发支出为

$$RD_{n,j,t} = \psi_{n,j,t}^R T_{n,t}^R = \psi_{n,j,t}^R \tau_{n,t}^R V A_{n,t}. \quad (32)$$

定义 $s_{n,t}$ 为总储蓄（即总投资支出）占增加值的比重：

$$s_{n,t} \equiv \frac{P_{n,t}^I I_{n,t}}{V A_{n,t}}, \quad P_{n,t}^I I_{n,t} = s_{n,t} V A_{n,t}. \quad (33)$$

代表性家庭的储蓄全部转化为投资，其预算约束为

$$P_{n,t}^C C_{n,t} + P_{n,t}^I I_{n,t} + T_{n,t}^R = I N_{n,t} = V A_{n,t} + D_{n,t}. \quad (34)$$

由此可得消费支出

$$\begin{aligned} P_{n,t}^C C_{n,t} &= I N_{n,t} - (s_{n,t} + \tau_{n,t}^R) V A_{n,t} \\ &= (1 - s_{n,t} - \tau_{n,t}^R) V A_{n,t} + D_{n,t}, \end{aligned} \quad (35)$$

其中，消费支出须满足

$$(1 - s_{n,t} - \tau_{n,t}^R) V A_{n,t} + D_{n,t} > 0. \quad (36)$$

资本存量按照下式演化：

$$K_{n,t+1} = (1 - \delta_{n,t}) K_{n,t} + I_{n,t}, \quad \delta_{n,t} \in [0, 1]. \quad (37)$$

（四） 贸易

国际贸易面临冰山型贸易成本。将部门 j 的某一品种从国家 i 运送至国家 n 时，为使目的地获得一单位产品，需要从来源国装运 $\kappa_{ni,j,t} \geq 1$ 单位，并设 $\kappa_{nn,j,t} = 1$ 。由此可得国家 n 对国家 i 的部门 j 支出份额

$$\pi_{ni,j,t} = \frac{\lambda_{i,j,t} (c_{i,j,t} \kappa_{ni,j,t})^{-\theta}}{\sum_{m=1}^N \lambda_{m,j,t} (c_{m,j,t} \kappa_{nm,j,t})^{-\theta}}. \quad (38)$$

相应的部门价格指数为

$$P_{n,j,t} = A^j \left[\sum_{i=1}^N \lambda_{i,j,t} (c_{i,j,t} \kappa_{ni,j,t})^{-\theta} \right]^{-1/\theta}, \quad (39)$$

其中

$$A^j \equiv \left[\Gamma \left(\frac{1 + \theta - \sigma^j}{\theta} \right) \right]^{\frac{1}{1 - \sigma^j}}. \quad (40)$$

令 $X_{ni,j,t}$ 表示国家 n 对来自国家 i 的部门 j 产品的支出, $X_{n,j,t}$ 表示国家 n 对该部门产品的总支出, 即

$$X_{n,j,t} \equiv \sum_{i=1}^N X_{ni,j,t}. \quad (41)$$

因此, 双边支出满足

$$X_{ni,j,t} = \pi_{ni,j,t} X_{n,j,t}. \quad (42)$$

(五) 市场出清

国家 n 部门 j 的总销售额等于各目的国对该部门产品的支出之和:

$$Y_{n,j,t} = \sum_{i=1}^N X_{in,j,t} = \sum_{i=1}^N \pi_{in,j,t} X_{i,j,t}. \quad (43)$$

劳动市场和资本市场出清分别要求

$$W_{n,t} L_{n,t} = \sum_{j=1}^J \gamma_{n,j} \beta_{n,j} Y_{n,j,t}, \quad (44)$$

$$R_{n,t} K_{n,t} = \sum_{j=1}^J \gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j}) Y_{n,j,t}. \quad (45)$$

部门 j 产品的总支出由最终消费、投资、研发支出和中间投入需求构成:

$$X_{n,j,t} = \alpha_{n,j}^C P_{n,t}^C C_{n,t} + \alpha_{n,j}^I P_{n,t}^I I_{n,t} + R D_{n,j,t} + \sum_{k=1}^J \gamma_{n,k}^j Y_{n,k,t}. \quad (46)$$

结合转移支付规则与产品市场出清条件, 国家 n 的净对外转移支付满足

$$D_{n,t} = -\phi_{n,t} (R_{n,t} K_{n,t} + W_{n,t} L_{n,t}) + L_{n,t} T_t^P = \sum_{j=1}^J (X_{n,j,t} - Y_{n,j,t}). \quad (47)$$

对所有国家加总可得全球收支平衡条件

$$\sum_{n=1}^N D_{n,t} = 0, \quad (48)$$

该条件可由式 (24)–(25) 直接推出。

序贯均衡。 给定下列外生变量的路径

$$\{\kappa_{ni,j,t}, \bar{\alpha}_{n,j,t}, G_{\bar{\alpha},n,j}, \tau_{n,t}^R, \psi_{n,j,t}^R, s_{n,t}, \delta_{n,t}, \phi_{n,t}, L_{n,t}\},$$

以及初始知识存量 $\{\lambda_{n,j,0}\}$ 和初始资本存量 $\{K_{n,0}\}$, 序贯均衡是价格、资源配置、贸易

表 1 模型的均衡条件

模块	均衡方程	索引范围
生产与贸易	$c_{n,j,t} = \Upsilon_{n,j} [W_{n,t}^{\beta_{n,j}} R_{n,t}^{1-\beta_{n,j}}]^{\gamma_{n,j}} \prod_k P_{n,k,t}^{\gamma_{n,k,j}^k}$	n, i, j, t
	$P_{n,j,t} = A^j \left[\sum_i \lambda_{i,j,t} (c_{i,j,t} \kappa_{ni,j,t})^{-\theta} \right]^{-1/\theta}$	
	$\pi_{ni,j,t} = \frac{\lambda_{i,j,t} (c_{i,j,t} \kappa_{ni,j,t})^{-\theta}}{\sum_m \lambda_{m,j,t} (c_{m,j,t} \kappa_{nm,j,t})^{-\theta}}$	
知识积累	$\alpha_{n,j,t}^R = \begin{cases} \bar{\alpha}_{n,a,t} (RD_{n,a,t} / V A_t^W)^{\varphi^a}, & j = a \\ \bar{\alpha}_{n,j,t} (RD_{n,j,t} / V A_t^W)^{\varphi^j} \lambda_{n,a,t}^{\xi^j}, & j \in \mathcal{J}_{-a} \end{cases}$	n, j, t
	$\Delta \lambda_{n,j,t+1} = \Gamma (1 - \rho^j) \alpha_{n,j,t}^R \lambda_{n,j,t}^{\rho^j}$	
	$\lambda_{n,j,t+1} = \lambda_{n,j,t} + \Delta \lambda_{n,j,t+1}$	
	$\bar{\alpha}_{n,j,t+1} = G_{\bar{\alpha},n,j} \bar{\alpha}_{n,j,t}$	
收入与政策	$P_{n,t}^C = \prod_j (P_{n,j,t} / \alpha_{n,j}^C)^{\alpha_{n,j}^C}$	n, j, t
	$P_{n,t}^I = \prod_j (P_{n,j,t} / \alpha_{n,j}^I)^{\alpha_{n,j}^I}$	
	$V A_{n,t} = W_{n,t} L_{n,t} + R_{n,t} K_{n,t}$	
	$I N_{n,t} = V A_{n,t} + D_{n,t}$	
	$T_{n,t}^R = \tau_{n,t}^R V A_{n,t}$	
	$R D_{n,j,t} = \psi_{n,j,t}^R T_{n,t}^R, \quad \sum_j \psi_{n,j,t}^R = 1$	
	$P_{n,t}^I I_{n,t} = s_{n,t} V A_{n,t}$	
市场出清	$I N_{n,t} = P_{n,t}^C C_{n,t} + P_{n,t}^I I_{n,t} + T_{n,t}^R$	n, j, t
	$Y_{n,j,t} = \sum_i \pi_{in,j,t} X_{i,j,t}$	
	$X_{n,j,t} = \alpha_{n,j}^C P_{n,t}^C C_{n,t} + \alpha_{n,j}^I P_{n,t}^I I_{n,t} + R D_{n,j,t} + \sum_k \gamma_{n,k}^j Y_{n,k,t}$	
	$W_{n,t} L_{n,t} = \sum_j \gamma_{n,j} \beta_{n,j} Y_{n,j,t}$	
资本积累	$R_{n,t} K_{n,t} = \sum_j \gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j}) Y_{n,j,t}$	n, t
	$K_{n,t+1} = (1 - \delta_{n,t}) K_{n,t} + I_{n,t}$	
对外收支平衡	$T_t^P = \frac{\sum_m \phi_{m,t} (R_{m,t} K_{m,t} + W_{m,t} L_{m,t})}{\sum_m L_{m,t}}$	n, t
	$D_{n,t} = -\phi_{n,t} (R_{n,t} K_{n,t} + W_{n,t} L_{n,t}) + L_{n,t} T_t^P = \sum_j (X_{n,j,t} - Y_{n,j,t})$	
	$\sum_n D_{n,t} = 0$	

注： $a \in \mathcal{J}$ 表示 ICT—AI 服务部门。参数 $s_{n,t} \equiv P_{n,t}^I I_{n,t} / V A_{n,t}$ 和 $\tau_{n,t}^R \equiv T_{n,t}^R / V A_{n,t}$ 分别表示总投资和研发占增加值的比重。消费与投资采用不同的部门份额和价格指数。 T_t^P 是由缴费率 $\phi_{n,t}$ 筹资、各国统一获得的人均转移支付。

流量、研发支出、投资、资本存量与知识存量的一组序列，使得各期均满足式 (1)–(48)。表 1 汇总了模型的均衡条件。

三、参数校准

本节利用国民账户、投入产出表、双边贸易以及劳动、资本、投资、价格和研发数据，对模型参数和基期变量进行校准。沿用前文记号，以 $n, i \in \mathcal{N}$ 表示国家，以 $j, k \in \mathcal{J} = \{1, \dots, J\}$ 表示部门，其中 $a \in \mathcal{J}$ 表示 ICT—AI 服务部门。

按照参数来源与识别方法，本文将待校准对象分为三类。第一类为依据现有文献赋值的外生参数，包括贸易弹性、部门内品种替代弹性、研发产出弹性和资本折旧率等。第二类为根据投入产出表及相关数据库直接构造的参数和变量，包括增加值份额、中间投入份额、消费与投资支出份额以及双边贸易份额等。第三类为利用模型均衡条件反推或通过回归估计得到的参数，主要包括知识存量、初始创新效率、既有知识弹性和 AI 知识溢出弹性。表 2 汇总了主要参数的经济含义、取值依据与校准方法。

表 2 主要参数及其校准方法

参数符号	参数含义	数据来源与校准方法
γ_{nj}^{VA}	增加值占总产出比重	通过投入产出表数据计算
γ_{nj}^k	中间投入占总产出比重	通过投入产出表数据计算
α_{nj}^C	居民消费支出份额	通过投入产出表数据计算
α_{nj}^I	投资支出份额	通过投入产出表数据计算
γ_{nj}^L	劳动收入占增加值份额	0.67, 参考 Gollin (2002)
γ_{nj}^K	资本收入占增加值份额	0.33, 参考 Gollin (2002)
θ	贸易弹性	4, 参考 Simonovska and Waugh (2014)
σ	行业内替代弹性	2, 参考 Broda and Weinstein (2006)
φ^j	研发产出弹性	0.3, 参考 Doraszelski and Jaumandreu (2013)
δ	资本折旧率	0.06, 参考 Sposi et al. (2026)
λ_{nj}	知识存量	待估
$\bar{\alpha}_{n,j,0}$	初始创新效率	待估
ξ^j	AI 知识溢出弹性	待估
ρ^j	既有知识弹性	待估

(一) 外生参数

贸易、生产与创新。贸易弹性记为 θ ，部门内品种替代弹性记为 $\sigma^j > 1$ 。参数 $\gamma_{n,j}$ 表示增加值占总产出的份额， $\beta_{n,j}$ 表示劳动报酬占增加值的份额。创新过程由 $\rho^j \in [0, 1)$ 、 $\varphi^j \geq 0$ 和 $\xi^j \geq 0$ 共同决定，并满足式 (11)。其中， $\bar{\alpha}_{n,j,t}$ 表示国家—部门层面的外生创新效率，并按照增长因子 $G_{\bar{\alpha},n,j}$ 演化； ξ^j 衡量 AI 部门知识存量对非 AI 部门创意到达率的弹性，且 $\xi^a = 0$ 。

政策、投资、转移与折旧。模型外生给定研发支出占增加值的份额 $\tau_{n,t}^R$ 、研发支出的部门配置份额 $\psi_{n,j,t}^R$ 、总投资支出占增加值的份额 $s_{n,t}$ 、折旧率 $\delta_{n,t}$ 、转移支付池缴费

率 $\phi_{n,t}$ 、人口 $L_{n,t}$ 以及劳动禀赋 $L_{n,t}$ 的路径。上述变量满足

$$\sum_{j=1}^J \psi_{n,j,t}^R = 1, \quad 0 \leq \phi_{n,t} < 1.$$

净对外转移支付 $D_{n,t}$ 为内生变量，由式 (24)–(25) 共同确定，因而 $\sum_n D_{n,t} = 0$ 自动成立。

(二) 由数据直接构造的参数与变量

生产份额与投入产出关联。令 $GO_{n,j,t}$ 、 $VA_{n,j,t}$ 和 $LAB_{n,j,t}$ 分别表示总产出、增加值和劳动报酬， $M_{n,t}^{jk}$ 表示部门 j 生产中使用的部门 k 中间投入价值。由此构造

$$\gamma_{n,j,t} = \frac{VA_{n,j,t}}{GO_{n,j,t}}, \quad (49)$$

$$\beta_{n,j,t} = \frac{LAB_{n,j,t}}{VA_{n,j,t}}, \quad (50)$$

$$\gamma_{n,j,t}^k = \frac{M_{n,t}^{jk}}{GO_{n,j,t}}, \quad (51)$$

上述成本份额满足

$$\gamma_{n,j,t} + \sum_{k=1}^J \gamma_{n,j,t}^k = 1. \quad (52)$$

最终需求份额与综合价格指数。令 $FC_{n,j,t}$ 表示部门 j 产品的最终消费支出， $INV_{n,j,t}$ 表示相应的投资支出。消费与投资的部门构成通常不同，因而分别定义

$$\alpha_{n,j,t}^C = \frac{FC_{n,j,t}}{\sum_{k=1}^J FC_{n,k,t}}, \quad \sum_{j=1}^J \alpha_{n,j,t}^C = 1, \quad (53)$$

$$\alpha_{n,j,t}^I = \frac{INV_{n,j,t}}{\sum_{k=1}^J INV_{n,k,t}}, \quad \sum_{j=1}^J \alpha_{n,j,t}^I = 1. \quad (54)$$

给定各部门复合品价格，消费价格指数与投资价格指数分别为

$$P_{n,t}^C = \prod_{j=1}^J \left(\frac{P_{n,j,t}}{\alpha_{n,j,t}^C} \right)^{\alpha_{n,j,t}^C}, \quad (55)$$

$$P_{n,t}^I = \prod_{j=1}^J \left(\frac{P_{n,j,t}}{\alpha_{n,j,t}^I} \right)^{\alpha_{n,j,t}^I}. \quad (56)$$

收入、转移、研发与投资。给定转移支付池缴费率 $\phi_{n,t}$ 、人口 $L_{n,t}$ 与要素收入，模型隐含的人均转移支付为

$$T_t^P = \frac{\sum_{m=1}^N \phi_{m,t} (R_{m,t} K_{m,t} + W_{m,t} L_{m,t})}{\sum_{m=1}^N L_{m,t}}. \quad (57)$$

国家 n 相应的净对外转移支付为

$$D_{n,t} = -\phi_{n,t} (R_{n,t} K_{n,t} + W_{n,t} L_{n,t}) + L_{n,t} T_t^P. \quad (58)$$

在数据中，净对外转移支付以总支出与总销售额之差衡量，即

$$D_{n,t}^{data} = \sum_{j=1}^J X_{n,j,t} - \sum_{j=1}^J Y_{n,j,t}, \quad (59)$$

校准时令 $D_{n,t} = D_{n,t}^{data}$ 。总增加值与国民收入分别为

$$VA_{n,t} = \sum_{j=1}^J VA_{n,j,t} = W_{n,t} L_{n,t} + R_{n,t} K_{n,t}, \quad (60)$$

$$IN_{n,t} = VA_{n,t} + D_{n,t}. \quad (61)$$

利用可观测的部门研发支出，研发支出总额、研发支出占增加值的份额及其部门配置份额分别为

$$T_{n,t}^R = \sum_{j=1}^J RD_{n,j,t}^{data}, \quad (62)$$

$$\tau_{n,t}^R = \frac{T_{n,t}^R}{VA_{n,t}}, \quad (63)$$

$$\psi_{n,j,t}^R = \frac{RD_{n,j,t}^{data}}{T_{n,t}^R}. \quad (64)$$

总投资支出占增加值的份额为

$$s_{n,t} = \frac{\sum_{j=1}^J INV_{n,j,t}}{VA_{n,t}}. \quad (65)$$

根据家庭预算约束，总投资支出与总消费支出满足

$$P_{n,t}^I I_{n,t} = s_{n,t} V A_{n,t}, \quad (66)$$

$$\begin{aligned} P_{n,t}^C C_{n,t} &= I N_{n,t} - (s_{n,t} + \tau_{n,t}^R) V A_{n,t} \\ &= (1 - s_{n,t} - \tau_{n,t}^R) V A_{n,t} + D_{n,t}, \end{aligned} \quad (67)$$

$$P_{n,t}^C C_{n,t} + P_{n,t}^I I_{n,t} + T_{n,t}^R = I N_{n,t} = V A_{n,t} + D_{n,t}. \quad (68)$$

部门支出、销售与贸易份额。国家 n 对部门 j 产品的总支出为

$$X_{n,j,t} = \alpha_{n,j,t}^C P_{n,t}^C C_{n,t} + \alpha_{n,j,t}^I P_{n,t}^I I_{n,t} + R D_{n,j,t} + \sum_{k=1}^J M_{n,t}^{kj}. \quad (69)$$

令 $X_{ni,j,t}$ 表示国家 n 对来自国家 i 的部门 j 产品的支出，则双边贸易份额为

$$\pi_{ni,j,t} = \frac{X_{ni,j,t}}{X_{n,j,t}}, \quad \sum_{i=1}^N \pi_{ni,j,t} = 1, \quad (70)$$

国家 n 部门 j 的总销售额为

$$Y_{n,j,t} = \sum_{i=1}^N X_{in,j,t} = \sum_{i=1}^N \pi_{in,j,t} X_{i,j,t}. \quad (71)$$

劳动、资本、工资与资本租金率。令 $L_{n,t}$ 表示劳动禀赋， $K_{n,t}$ 表示资本存量。由要素市场出清条件可得工资与资本租金率

$$W_{n,t} = \frac{\sum_{j=1}^J \gamma_{n,j} \beta_{n,j} Y_{n,j,t}}{L_{n,t}}, \quad (72)$$

$$R_{n,t} = \frac{\sum_{j=1}^J \gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j}) Y_{n,j,t}}{K_{n,t}}. \quad (73)$$

相应地，劳动与资本在各部门之间的配置为

$$L_{n,j,t} = \frac{\gamma_{n,j} \beta_{n,j} Y_{n,j,t}}{W_{n,t}}, \quad (74)$$

$$K_{n,j,t} = \frac{\gamma_{n,j} (1 - \beta_{n,j}) Y_{n,j,t}}{R_{n,t}}. \quad (75)$$

资本积累。实际投资量为

$$I_{n,t} = \frac{s_{n,t} V A_{n,t}}{P_{n,t}^I}. \quad (76)$$

给定相邻两期的资本存量，可由资本积累方程反推折旧率：

$$\delta_{n,t} = 1 - \frac{K_{n,t+1} - I_{n,t}}{K_{n,t}}. \quad (77)$$

（三） 知识存量

参考 Sposi et al. (2026) 的方法，本文利用价格、投入结构和贸易份额数据校准地区-部门层面的知识存量。校准分为以下两步。

第一步，根据部门价格、要素价格与投入产出结构构造单位成本。对于地区 n 在 t 年的要素价格，工资 $W_{n,t}$ 由劳动报酬与有效劳动之比计算，资本租金率 $R_{n,t}$ 由资本报酬与资本存量之比计算。部门价格以美国经济分析局（BEA）公布的行业价格指数为基准，并结合贸易引力方程估计得到的进口国固定效应反推其他地区的部门价格。投入产出表则用于计算各部门的劳动、资本和中间投入成本份额。由此，地区 n 部门 j 在 t 年的单位成本为

$$c_{n,j,t} = \Upsilon_{n,j,t} W_{n,t}^{\gamma_{n,j,t}^L} R_{n,t}^{\gamma_{n,j,t}^K} \prod_{k=1}^J P_{n,k,t}^{\gamma_{n,j,t}^k}. \quad (78)$$

其中， $\gamma_{n,j,t}^L$ 、 $\gamma_{n,j,t}^K$ 和 $\gamma_{n,j,t}^k$ 分别表示劳动、资本和中间投入的成本份额， $\Upsilon_{n,j,t}$ 为相应的 Cobb–Douglas 份额常数。由于 BEA 行业分类与本文的部门划分并不完全一致，本文对 BEA 细分行业价格指数进行映射与聚合。具体而言，首先依据 BEA 与 NAICS、NAICS 与 ISIC 之间的行业转换表，将 BEA 细分行业映射至 ISIC 行业。若某一 BEA 行业仅对应一个 ISIC 行业，则直接采用其价格指数；若同时对应多个 ISIC 行业，则按等比例原则将价格和产出信息拆分至相应行业。其次，按照本文的 13 部门分类进一步聚合 ISIC 行业。对于包含多个细分行业的部门，以各细分行业当年总产出为权重计算部门价格指数。由于缺乏 AI 部门和其他 ICT 部门各自独立的价格指数，本文假定二者的价格变化均与 ICT 部门一致。

第二步，利用国内贸易份额反推知识存量。在开放经济中，地区-部门价格既取决于本地生产成本，也受到贸易机会、来源国生产率差异和市场竞争的影响。由贸易份额方程可得

$$\lambda_{n,j,t} = \pi_{nn,j,t} \left(\frac{A^j c_{n,j,t}}{P_{n,j,t}} \right)^{\theta}. \quad (79)$$

其中， $\pi_{nn,j,t}$ 表示国内采购额占地区 n 部门 j 总支出的比重， A^j 为由贸易弹性 θ 和替代弹性 σ 决定的 Fréchet 分布常数， $\lambda_{n,j,t}$ 表示地区-部门层面的知识存量。本文以 2012–2022 年为样本期，逐年更新地区-部门知识存量，并以 2022 年为反事实模拟的基期。进一步地，由贸易份额方程可反推出双边贸易成本：

$$\kappa_{ni,j,t} = \left[\left(\frac{\pi_{ni,j,t}}{\pi_{nn,j,t}} \right) \frac{\lambda_{n,j,t} c_{n,j,t}^{-\theta}}{\lambda_{i,j,t} c_{i,j,t}^{-\theta}} \right]^{-1/\theta}, \quad \kappa_{nn,j,t} = 1. \quad (80)$$

(四) 初始创新效率

知识存量反映地区-部门的既有技术基础，但不能直接衡量给定研发投入下新增知识的形成效率。为此，本文进一步校准初始创新效率 $\bar{\alpha}_{n,j,0}$ 。

根据式 (17)，在给定研发投入、既有知识存量和 AI 知识溢出弹性的条件下，可由知识增量反推地区-部门层面的初始创新效率。本文以 $RD_{n,j,2022}/VA_{2022}^W$ 衡量基期标准化研发强度。将基期研发投入和知识存量代入知识积累方程，得到

$$\bar{\alpha}_{n,j,0} = \frac{\lambda_{n,j,t} - \lambda_{n,j,t-1}}{\Gamma(1 - \rho_j) (RD_{n,j,2022}/VA_{2022}^W)^{\varphi_j} \lambda_{n,AI,2022}^{\xi_j} \lambda_{n,j,2022}^{\rho_j}}. \quad (81)$$

其中，分子为基期实际新增知识，分母综合反映标准化研发强度、既有知识存量和 AI 知识溢出对知识生产的影响。因此， $\bar{\alpha}_{n,j,0}$ 衡量在控制上述因素后，研发投入转化为新增知识的基础效率。由于缺乏外生创新效率未来变化的直接数据，本文假定初始创新效率在预测期内保持不变。在这一设定下，反事实路径之间的技术差异主要来自研发资源再配置引致的内生知识积累变化。

(五) AI 部门的溢出效应

AI 技术既可能提高 AI 部门自身的生产效率，也可能通过知识扩散、技术迁移和投入产出联系促进其他部门的知识积累。为刻画这一跨部门作用，本文依据知识生产函数估计 AI 知识溢出弹性 ξ^j 和既有知识弹性 ρ^j 。根据式 (17)，AI 部门与非 AI 部门的知识增长率分别为

$$\frac{\lambda_{n,j,t+1} - \lambda_{n,j,t}}{\lambda_{n,j,t}} = \begin{cases} \Gamma(1 - \rho^j) \bar{\alpha}_{n,j,t} \left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W} \right)^{\varphi_j} \times \lambda_{n,j,t}^{\rho^j - 1}, & j = a, \\ \Gamma(1 - \rho^j) \bar{\alpha}_{n,j,t} \left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W} \right)^{\varphi_j} \times \lambda_{n,a,t}^{\xi^j} \lambda_{n,j,t}^{\rho^j - 1}, & j \in \mathcal{J} \setminus \{a\}. \end{cases} \quad (82)$$

对式 (82) 两边取自然对数，可得知识存量增长率与研发强度、既有知识存量及 AI 知识溢出之间的关系：

$$\ln\left(\frac{\lambda_{n,j,t+1} - \lambda_{n,j,t}}{\lambda_{n,j,t}}\right) = \varphi^j \ln\left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W}\right) + \xi^j \ln(\lambda_{n,a,t}) + (\rho^j - 1) \ln(\lambda_{n,j,t}), \quad (83)$$

其中， ξ^j 衡量 AI 部门知识存量对非 AI 部门知识增长率的弹性， $\rho^j - 1$ 衡量本部门既有知识存量对下一期知识增长率的影响。AI 部门自身的知识增长方程不含 ξ^j 项。基于上述关系，本文设定如下估计方程：

$$\ln(\lambda_{GR_{n,j,t+1}}) = \beta_1 \ln\left(\frac{RD_{n,j,t}}{VA_t^W}\right) + \beta_2 \ln \lambda_{n,j,t} + \beta_3 \ln \lambda_{n,a,t} + \mu_{n,j} + \mu_{j,t} + \epsilon_{n,j,t}, \quad (84)$$

其中， $\lambda_{GR_{n,j,t+1}}$ 表示地区 n 部门 j 在 $t+1$ 期的知识存量增长率， $RD_{n,j,t}/VA_t^W$ 表示 t 期的标准化研发强度， $\lambda_{n,j,t}$ 和 $\lambda_{n,a,t}$ 分别表示本部门与 AI 部门在 t 期的知识存量。 $\mu_{n,j}$ 和 $\mu_{j,t}$ 分别为地区一部门固定效应与部门一年份固定效应， ϵ_{ijt} 为随机扰动项。对于仅使用 AI 部门样本的回归，估计方程不包含 $\ln \lambda_{n,a,t}$ 项，并相应控制地区固定效应和年份固定效应。根据式 (83) 与式 (84) 的对应关系，既有知识弹性为 $\rho^j = 1 + \beta_2$ ，AI 知识溢出弹性为 $\xi^j = \beta_3$ 。

表 3 报告估计结果。第 (1) 和第 (4) 列使用 AI 部门样本，第 (2) 和第 (5) 列使用非 AI 部门样本，第 (3) 和第 (6) 列使用全样本；前三列控制标准化研发强度，后三列不控制该变量。各列中 $\ln(\lambda)$ 的估计系数均显著为负，表明既有知识存量越高，新增知识的增长率越低，知识生产具有边际递减特征。由此可得模型中的既有知识弹性 ρ^j 。在全样本回归中，AI 部门知识存量 $\ln(\lambda_{AI})$ 的估计系数分别为 0.299 和 0.298，均在 10% 的显著性水平上为正。这一结果为 AI 部门知识存量促进非 AI 部门知识增长的跨部门溢出机制提供了支持性证据，并据此校准 AI 知识溢出弹性 ξ^j 。

表 3 AI 知识溢出效应的估计结果

被解释变量：知识存量增长率的自然对数 ($\ln(\lambda_{GR})$)						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
$\ln(RD/VA)$	0.089 (0.233)	0.057 (0.160)	0.074 (0.155)			
$\ln(\lambda)$	-0.950** (0.370)	-0.737*** (0.142)	-0.775*** (0.153)	-0.903** (0.314)	-0.733*** (0.141)	-0.773*** (0.152)
$\ln(\lambda_{AI})$			0.299* (0.159)			0.298* (0.160)
地区固定效应	是	否	否	是	否	否
年份固定效应	是	否	否	是	否	否
地区一部门固定效应	否	是	是	否	是	是
部门一年份固定效应	否	是	是	否	是	是
观测值	69	620	551	69	620	551
调整后 R^2	0.503	0.417	0.409	0.513	0.418	0.410

注：第 (1) 和第 (4) 列为 AI 部门样本，第 (2) 和第 (5) 列为非 AI 部门样本，第 (3) 和第 (6) 列为全样本。括号内为聚类到地区层面的稳健标准误。*、** 和 *** 分别表示在 10%、5% 和 1% 的水平上显著。

四、 数据说明

（一） AI 部门的构造

为将 AI 部门纳入全球投入产出体系并开展量化分析，首先需要在现有部门分类中识别 AI 相关经济活动。本文参照 Bekkers et al. (2025) 的方法，以 OECD 国家间投入产出表 (Inter-Country Input-Output Tables, ICIO) 为基础，将原信息通信技术 (ICT) 部门拆分为 AI 部门和其他 ICT 部门 (Other ICT)。具体步骤如下：首先，根据 AI 生产的投入特征设定其成本结构；其次，依据全球 AI 产业规模确定 AI 部门的总产出，并利用 AI 专利分布将其分配至不同经济体；再次，基于 AI 暴露程度衡量各部门对 AI 部门的潜在需求，据此构造 AI 部门的中间投入销售结构；最后，在给定各地区 AI 供给和需求总量的条件下，以原 ICT 部门的双边贸易矩阵为初始结构，运用 RAS 迭代方法构造 AI 部门的双边贸易矩阵。

1. AI 部门的投入结构

AI 是一项高度依赖算力和数字基础设施的通用技术，其生产既需要信息通信技术、电子设备和电力等中间投入，也需要资本和劳动等初始要素。Cottier et al. (2024) 指出，AI 模型的训练、部署和运行均具有较高的计算资源投入强度，因而其投入结构与传统 ICT 部门存在明显差异。基于这一特征并参照 Bekkers et al. (2025)，本文设定 AI 部门自身投入、其他 ICT 投入、电子设备投入和电力投入占总成本的比重分别为 5%、45%、20% 和 5%，其余 25% 为增加值。上述设定反映了 AI 生产对算力基础设施、硬件设备、数字服务和初始要素的共同依赖。

在增加值内部，本文进一步区分资本报酬和劳动报酬。参照 Sposi et al. (2026) 对要素收入份额的设定，假定资本报酬和劳动报酬占 AI 部门增加值的比重分别为 0.33 和 0.67。上述中间投入份额和增加值份额共同构成 AI 部门的成本结构，并作为从原 ICT 部门拆分 AI 部门时的投入约束。

2. AI 部门的全球规模

在确定成本结构后，还需校准 AI 部门的全球规模。根据 UNCTAD (2025) 的估计，本文将 2024 年全球 AI 产业规模设定为 2560 亿美元，并以此为基准，按照 14% 的年均增长率反推样本期各年的全球 AI 服务规模。

3. AI 部门的生产分布

鉴于缺少口径一致的跨国 AI 产出数据，本文以 AI 专利份额代理不同地区 AI 创新活动的相对强度，并据此分配给定年份的全球 AI 服务产出。设地区 n 在年份 t 的 AI 专利数量为 $Patent_{n,t}$ ，则该地区的 AI 生产份额定义为

$$Share_{n,t} = \frac{Patent_{n,t}}{\sum_n Patent_{n,t}}. \quad (85)$$

式 (85) 刻画不同经济体 AI 创新活动的相对强度。本文据此确定全球 AI 服务产出的地区分布，各地区 AI 生产份额在每一年均加总为 1。

4. AI 部门的需求结构

在确定 AI 部门的全球规模及其地区分布后，本文进一步构造 AI 部门的需求结构。AI 服务需求由最终需求和中间投入需求两部分组成。对于最终需求，本文假定 AI 部门与原 ICT 部门具有相同的需求构成，即保持原 ICT 部门在居民消费、投资和其他最终需求中的比例不变，再依据 AI 部门与其他 ICT 部门的相对规模拆分原 ICT 部门的最终需求。

对于中间投入需求，考虑到 AI 技术在不同行业中的应用程度存在明显差异，本文利用地区-行业层面的 AI 暴露程度 (AI exposure) 对原 ICT 部门的中间投入销售结构进行重新加权。一个行业的 AI 暴露程度越高，表明其生产任务与 AI 技术的关联越强，因而对 AI 服务投入的潜在需求越大。具体而言，AI 部门向地区 n 的部门 j 销售中间投入的相对权重设定为

$$AI_{n,j,t} = ICT_{n,j,t} \times Exposure_{n,j,t}, \quad (86)$$

其中， $ICT_{n,j,t}$ 表示原 ICT 部门在 t 年向地区 n 的部门 j 提供中间投入的份额， $Exposure_{n,j,t}$ 表示相应的 AI 暴露程度。式 (86) 以原 ICT 部门的销售结构为基准，并利用 AI 暴露程度调整各地区、各行业的需求权重。

AI 暴露指标以 Felten et al. (2021) 构造的职业 AI 暴露指数 (Artificial Intelligence Occupational Exposure, AIOE) 为基础，并结合各地区的职业就业结构计算。对于美国，美国劳工统计局 (Bureau of Labor Statistics, BLS) 提供了能够与 AIOE 指数相匹配的职业-行业就业数据，本文据此以各职业就业人数为权重，计算行业层面的 AI 暴露程度。对于美国以外的经济体，国际劳工组织数据库 (ILOSTAT) 通常仅提供 ISCO 一位数职业组-行业就业数据，无法与细分职业层面的 AIOE 指数直接匹配。为此，本文首先以美国细分职业的就业人数为权重，计算各 ISCO 一位数职业组的平均 AI 暴露程度；再结合其他经济体的职业-行业就业结构进行加权，得到地区-行业-年份层面的 AI 暴露程度：

$$Exposure_{n,j,t} = \sum_o \frac{Emp_{o,n,j,t}}{\sum_o Emp_{o,n,j,t}} AIOE_o, \quad (87)$$

其中， n 、 j 和 o 分别表示地区、行业 and 职业， $Emp_{o,n,j,t}$ 表示年份 t 地区 n 的行业 j 中职业 o 的就业人数， $AIOE_o$ 表示职业 o 的 AI 暴露程度。指标 $Exposure_{n,j,t}$ 的数值越大，表明该行业的职业任务与 AI 技术的关联程度越高，潜在的 AI 服务需求也越强。

5. AI 部门的双边贸易结构

在获得各地区 AI 部门的供给和需求规模后，本文进一步构造 AI 部门的双边贸易矩阵。具体而言，以原始投入产出表中 ICT 部门的双边贸易矩阵作为初始矩阵，利用 RAS 方法反复调整其行、列加总值，使其与 AI 部门的地区供给和需求相匹配。调整后的贸易矩阵满足以下条件：第一，各供给地区的 AI 部门销售总额等于该地区 AI 部门总产出；第二，各需求地区的 AI 部门购买总额等于该地区 AI 部门总需求；第三，全球 AI 部门销售总额与购买总额相等。此外，为避免进口来源过度集中，本文要求任一经济体从单一外国经济体进口的 AI 部门不超过其 AI 服务进口总额的 95%。这一处理既保留了原 ICT 部门双边贸易结构所包含的信息，又使构造得到的 AI 贸易矩阵与地区供给和行业需求

相一致。

（二）数据来源

本文使用的数据主要包括投入产出关系、AI 技术创新、职业就业结构、宏观经济变量、部门价格和研发投入六类。第一，投入产出数据来自经济合作与发展组织（OECD）发布的国家间投入产出表，用于构造不同经济体和部门之间的中间投入关系、增加值、最终需求及双边贸易联系。第二，专利数据来自 OECD 专利统计数据库，包括 AI 相关专利、ICT 部门专利以及各经济体全部专利的数量。第三，职业就业结构数据来自美国劳工统计局和国际劳工组织数据库，涵盖不同经济体、行业和职业的就业分布。第四，经济规模、人口等宏观变量主要来自 Penn World Table 11.0；双边距离、共同语言和殖民关系等贸易成本变量来自 CEPII Gravity 数据库。第五，部门价格数据来自美国经济分析局（Bureau of Economic Analysis, BEA），主要用于对相关名义变量进行价格调整。第六，研发投入数据来自 OECD 企业研发分析数据库（Analytical Business Enterprise Research and Development, ANBERD），包括不同经济体和部门的研发支出。

本文的样本期为 2012–2022 年。将 2012 年作为样本起点，主要是因为随着深度学习算法取得突破、计算能力提高和数据资源积累，AI 技术自此进入较快发展阶段，并逐渐成为影响全球生产网络的重要通用技术。受数据库发布频率和覆盖范围限制，不同变量的可得年份并不完全一致。进入模型前，本文将各来源数据统一匹配至地区–部门–年份层面。

（三）部门与地区划分

根据研究需要，本文对 OECD 国家间投入产出表中的行业和经济体进行聚合。在部门层面，首先将原始行业归并为 12 个基础部门，再将其中的 ICT 部门拆分为 AI 部门和其他 ICT 部门，最终得到表 4 所列的 13 个部门。在地区层面，将样本经济体归并为 15 个主要地区，并将未单独列示的经济体合并为世界其他地区（ROW），最终得到表 5 所列的 16 个地区。

表 5 模型中的地区划分

地区代码	包含的经济体和地区
ODE	澳大利亚、瑞士、冰岛、挪威、新西兰
WEU	奥地利、比利时、德国、丹麦、西班牙、芬兰、法国、希腊、爱尔兰、意大利、卢森堡、马耳他、荷兰、葡萄牙、瑞典
EEU	保加利亚、塞浦路斯、捷克、爱沙尼亚、克罗地亚、匈牙利、立陶宛、拉脱维亚、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、斯洛文尼亚
SEA	文莱、印度尼西亚、马来西亚、菲律宾、新加坡、泰国、越南
CAN	加拿大
CHN	中国
MNA	埃及、以色列、约旦、摩洛哥、沙特阿拉伯、突尼斯

GBR	英国
EAS	中国香港地区、中国台湾地区
IND	印度
JPN	日本
KOR	韩国
RUS	俄罗斯
TUR	土耳其
USA	美国
ROW	世界其他国家和地区

五、 机制分解

为考察不同机制在模型动态调整中的作用，本文将各项机制均开启、其余外生路径保持基准设定时得到的均衡路径定义为完整模型基准路径，并分别构造四个单项机制关闭情形。具体而言：第一，关闭 AI 部门对非 AI 部门的知识溢出，即令 $\xi^j = 0$ ；第二，取消既有知识存量对新增知识生产的作用，即令 $\rho^j = 0$ ；第三，关闭研发形成新增知识的机制，即令 $\bar{\alpha}_{n,j,0} = 0$ ；第四，将中国与其他地区之间的贸易成本设定为基准水平的 100 倍，以近似刻画中国处于封闭状态的情形。本文还报告同时关闭上述四种机制的联合情形。四个单项实验彼此独立，均与同一完整模型基准路径比较；这些实验衡量的是改变模型结构后的相对水平变化，而不是彼此独立且可以加总的机制贡献率。

图 1—图 3 分别报告五种机制关闭情形下人均资本、人均消费和人均收入相对于完整模型基准路径的百分比变化。表 6 进一步选取 2030—2100 年的十年期节点，列示相应变量相对于基准路径的降幅。为便于比较，表中将图中的负向变化转换为正的降幅百分比；例如，88.26 表示相应变量水平比完整模型基准路径低 88.26%。

结果表明，完整模型的长期转轨路径对知识创造、知识积累、跨部门溢出和国际贸易等机制较为敏感。以人均资本为例，关闭 AI 知识溢出和取消既有知识对新增知识形成的作用所产生的路径较为接近；到 2100 年，人均资本分别比完整模型基准路径低 88.26% 和 88.13%。关闭新增知识形成机制后，降幅扩大至 91.08%。在中国近似处于封闭状态的情形下，人均资本到 2100 年下降 71.98%。这些结果描述了各项模型设定改变后均衡转轨路径的累计相对缺口，不构成对各机制贡献大小的直接排序。

人均消费和人均收入对机制关闭的反应出现得更早。2030 年，中国近似处于封闭状态时，人均消费比完整模型基准路径低 42.02%，降幅高于其他单一机制情形，反映了贸易成本变化对当期可获得产品、投入成本和资源配置的直接影响。随着模拟期延长，知识动态的累积作用逐渐增强。到 2100 年，关闭新增知识形成后，人均消费和人均收入分别下降 92.16% 和 92.17%，其降幅均高于其他单一机制关闭情形。

同时关闭四种机制在各年份均产生最大的降幅。到 2100 年，人均资本、人均消费和人均收入分别比完整模型基准路径低 91.85%、94.11% 和 93.46%。由于联合关闭情形

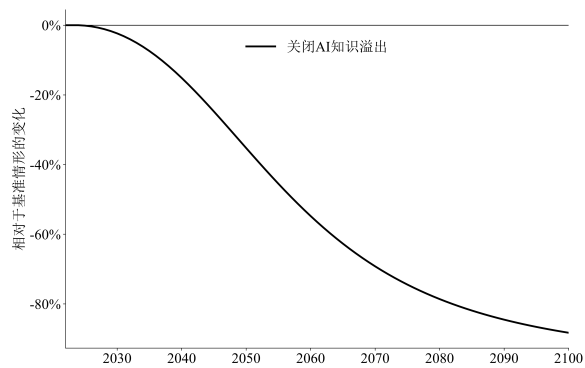
表 4 模型中的部门划分

部门代码	定义
AGC	农业、林业和渔业
MNG	采矿业（包括能源与非能源采矿）
OTG	其他制造业及货物生产部门
PCH	焦炭和精炼石油产品
MET	基本金属和金属制品
COM	计算机和电子设备
ELE	电气设备
MEQ	机械、汽车和其他运输设备
EUT	电力、公用事业和建筑
TBO	贸易、运输和商业服务
AI	由 ICT 服务部门拆分得到的 AI 部门
OtherICT	ICT 服务部门中除 AI 部门以外的部分
OTS	住宿餐饮、公共服务、教育、卫生和其他服务

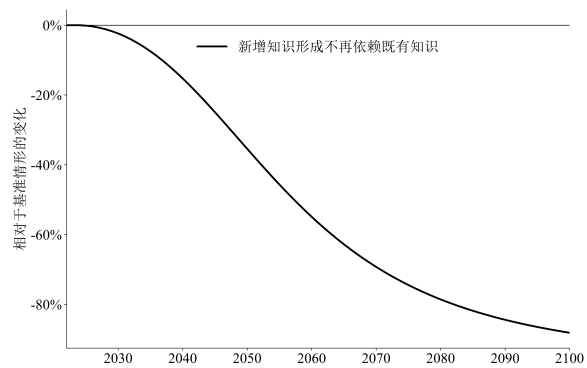
表 6 关闭不同机制后人均变量相对于完整模型基准路径的降幅（%）

变量与分解情形	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100
面板 A：人均资本存量 K/L								
关闭 AI 知识溢出	2.35	15.13	35.25	54.77	69.20	78.60	84.50	88.26
新增知识形成不再依赖既有知识	2.38	15.24	35.41	54.89	69.25	78.57	84.42	88.13
关闭新增知识形成	2.56	16.31	37.64	57.94	72.61	81.91	87.58	91.08
中国近似处于封闭状态	2.42	12.33	27.41	42.42	54.15	62.38	68.03	71.98
四种机制均关闭	3.33	18.06	39.83	60.01	74.31	83.22	88.58	91.85
面板 B：人均消费 C/L								
关闭 AI 知识溢出	31.27	51.46	64.10	72.96	79.20	83.55	86.61	88.80
新增知识形成不再依赖既有知识	32.00	52.48	65.11	73.85	79.94	84.16	87.10	89.20
关闭新增知识形成	33.96	55.53	68.57	77.37	83.36	87.43	90.21	92.16
中国近似处于封闭状态	42.02	56.31	66.99	75.20	81.01	84.92	87.51	89.26
四种机制均关闭	46.99	64.63	75.26	82.39	87.19	90.42	92.60	94.11
面板 C：人均收入 Y/L								
关闭 AI 知识溢出	31.31	51.47	64.10	72.96	79.19	83.53	86.58	88.77
新增知识形成不再依赖既有知识	32.11	52.58	65.20	73.92	79.99	84.20	87.13	89.22
关闭新增知识形成	34.06	55.64	68.66	77.44	83.41	87.46	90.23	92.17
中国近似处于封闭状态	33.61	47.45	57.68	65.64	71.51	75.67	78.62	80.76
四种机制均关闭	42.58	61.60	73.06	80.75	85.94	89.44	91.81	93.46

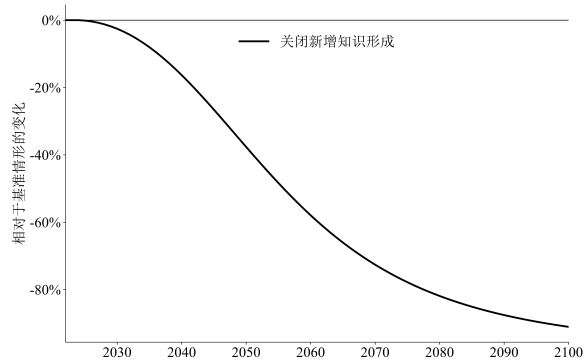
注：表中数值为关闭相应机制后变量水平相对于完整模型基准路径的减少幅度，单位为百分比，并以正数表示。各行并非可加总的机制贡献率。



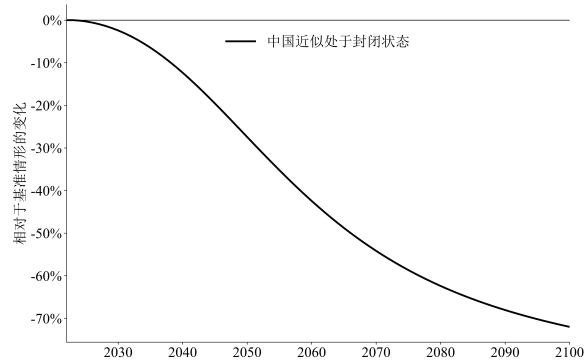
(a) 关闭 AI 知识溢出: $\xi^j = 0$



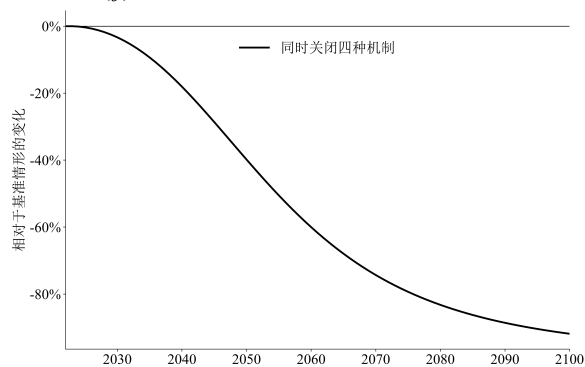
(b) 新增知识形成不再依赖既有知识: $\rho^j = 0$



(c) 关闭新增知识形成: $\bar{\alpha}_{n,j,0} = 0$

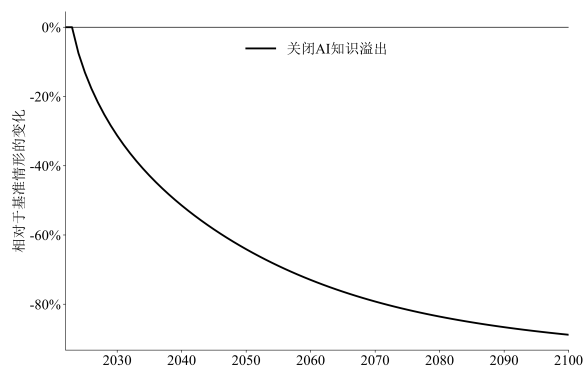


(d) 中国近似处于封闭状态

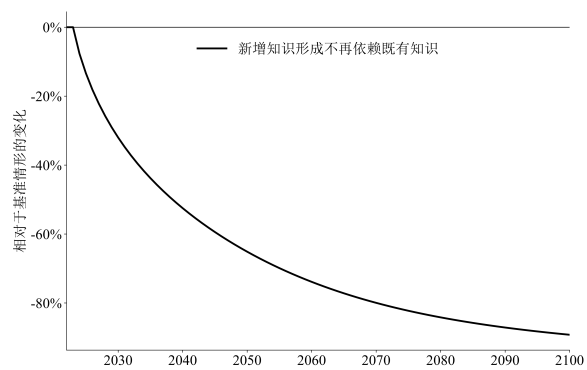


(e) 同时关闭四种机制

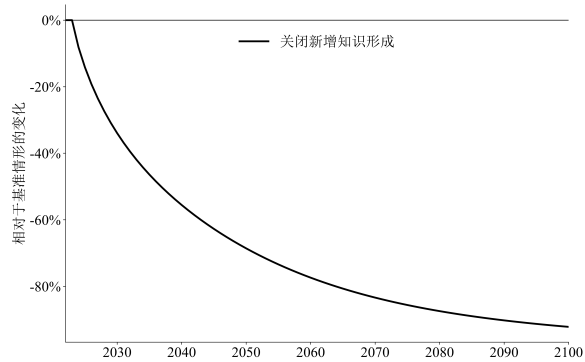
图 1 关闭不同机制后人均资本 K/L 相对于完整模型基准路径的变化 (%)



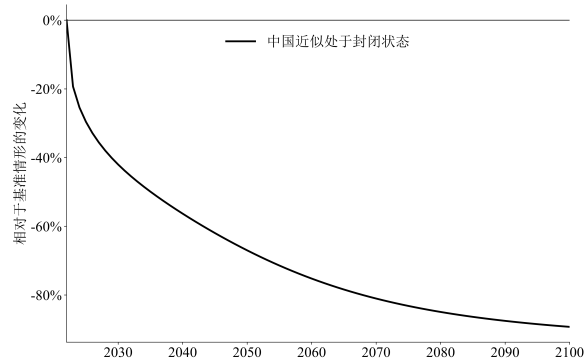
(a) 关闭 AI 知识溢出: $\xi^j = 0$



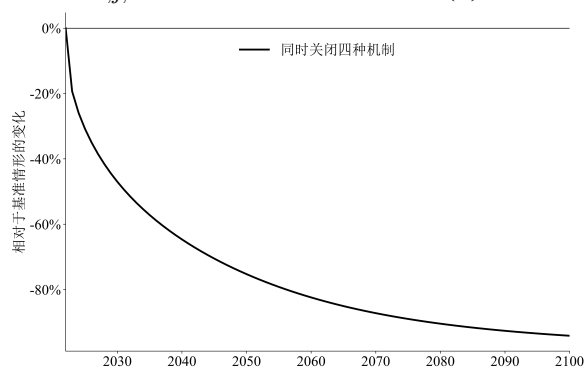
(b) 新增知识形成不再依赖既有知识: $\rho^j = 0$



(c) 关闭新增知识形成: $\bar{\alpha}_{n,j,0} = 0$



(d) 中国近似处于封闭状态



(e) 同时关闭四种机制

图 2 关闭不同机制后人均消费 C/L 相对于完整模型基准路径的变化 (%)

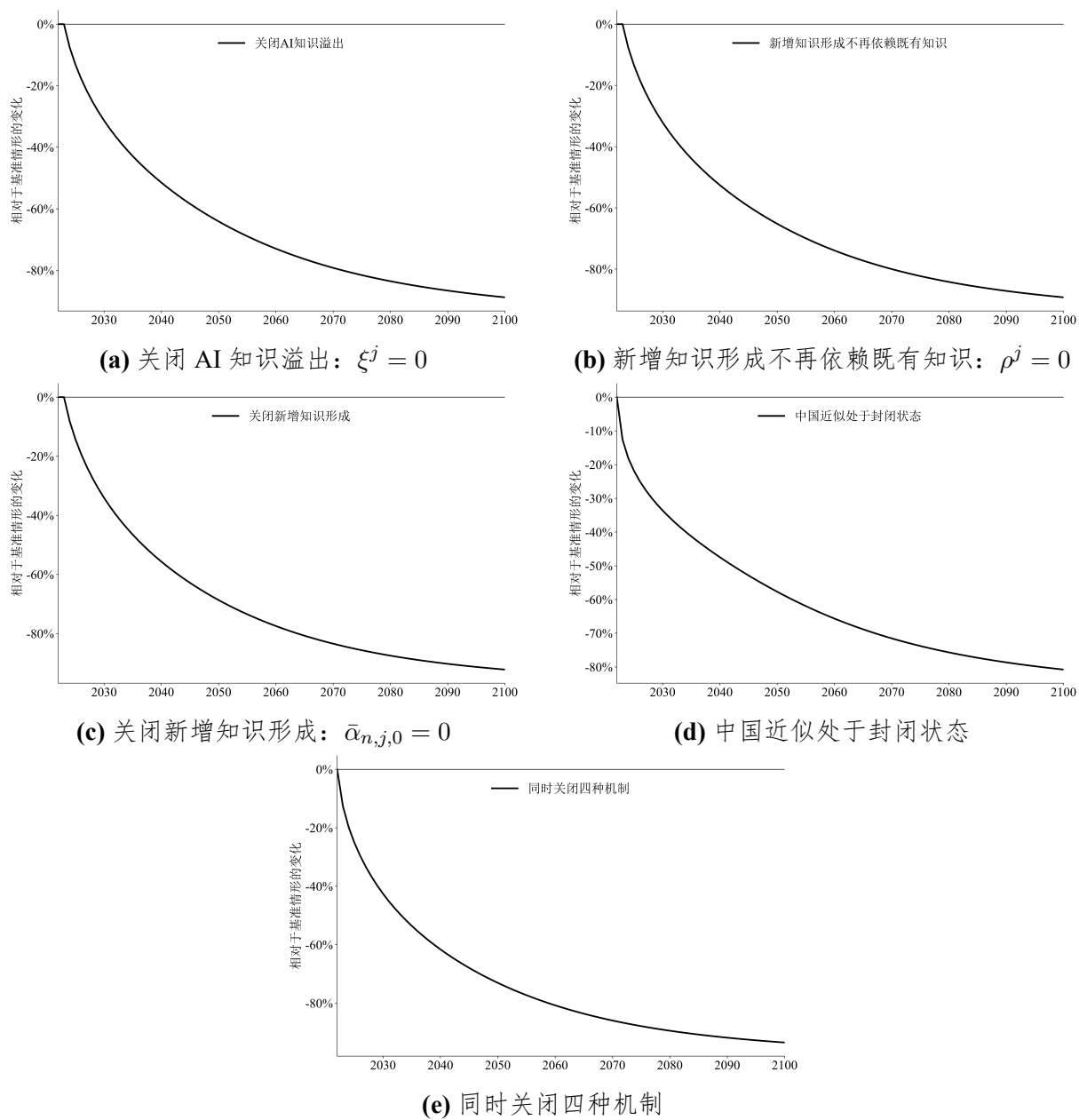


图 3 关闭不同机制后人均收入 Y/L 相对于完整模型基准路径的变化 (%)

与各单项关闭情形之间存在嵌套关系，且模型包含一般均衡反馈和非线性动态，联合降幅不能由各单项降幅简单加总，各项结果也不宜解释为彼此独立的机制贡献率。

值得注意的是，若干单项机制关闭情形下的长期降幅已经接近联合关闭情形。这表明，在本文模型及参数校准下，知识溢出、既有知识对创新的作用、新增知识形成和国际贸易共同构成 AI 研发影响经济转轨路径的关键环节；其中任何一个环节受到抑制，都可能通过一般均衡反馈削弱其他渠道的作用，并形成制约长期收益实现的瓶颈。因此，将上述机制纳入统一框架，有助于较为完整地刻画 AI 研发再配置对中国经济增长和资源配置的动态影响。上述结果也进一步为本文的理论框架提供了模型内部的数量依据。

六、政策模拟

本节以 2022 年为基期，通过四组反事实模拟考察研发资源向 AI 部门再配置的动态效应及其对外部环境和宏观条件的敏感性。第一，在保持中国研发支出占增加值的比例不变时，于 2023–2032 年将非 AI 部门研发投入的 30% 转向 AI 部门，并于 2033 年恢复基准研发结构。第二，在上述政策情形中进一步提高中国与其他地区之间的贸易成本。第三，在研发再配置的同时引入劳动力供给下降。第四，在研发再配置的同时降低投资率。第一组模拟将研发再配置路径与原基准路径比较；其余三组模拟则分别将“冲击叠加研发再配置”的路径与“仅发生相同冲击”的路径比较。因此，后三组结果衡量的是给定外部条件下研发再配置的边际效应，而不是贸易成本、劳动力或投资率变化本身的总效应。

（一）基准研发再配置情形

本情形考察研发支出占增加值的比例不变时，研发资源部门配置变化所产生的动态影响。具体而言，在 2023–2032 年期间，将非 AI 部门研发投入的 30% 转向 AI 部门，并自 2033 年起恢复基准研发结构。由于增加值会随均衡路径变化，研发支出总额仍可能内生调整。这里的 30% 是用于刻画阶段性研发再配置的情景参数，并非模型求解得到的最优配置比例。

图 4 报告研发再配置路径相对于基准路径的百分比变化。政策实施初期，人均消费和人均收入均低于基准路径，并于 2027 年前后达到约 -1.0% 的低点；随着研发结构恢复和 AI 知识逐步积累，两者于 2034 年前后转为正值。人均资本的调整更为滞后，其相对差异于 2033–2034 年前后降至约 -0.15%，并于 2038 年前后超过基准路径。

这一动态反映了研发再配置的当期机会成本与 AI 知识积累的滞后收益。在研发总规模不变时，增加 AI 部门研发会相应挤出非 AI 部门研发；与此同时，AI 研发需要经过知识形成、生产率提高和跨部门扩散等环节才能影响总量变量，因而短期内研发挤出效应占据主导。随着 AI 知识存量及其跨部门溢出持续累积，研发再配置的净效应逐步转为正向。

量化结果显示，到 2050 年，人均资本、人均消费和人均收入分别比基准路径高约 2.1%、4.7% 和 4.7%；到 2100 年，三者分别高约 8.4%、7.1% 和 7.0%。上述数值衡量的是各时点相对于基准路径的水平差异，并不意味着相应变量的长期增长率得到永久提高。

尽管如此，在本文的模型和情景设定下，阶段性地将研发资源向 AI 部门再配置，即使在政策退出后，仍可通过 AI 知识积累及其跨部门溢出产生持续的长期影响，使人均资本、人均消费和人均收入最终高于基准路径。总体而言，研发资源向 AI 部门倾斜虽然伴随着短期调整成本，但能够带来较为持久的长期水平收益。

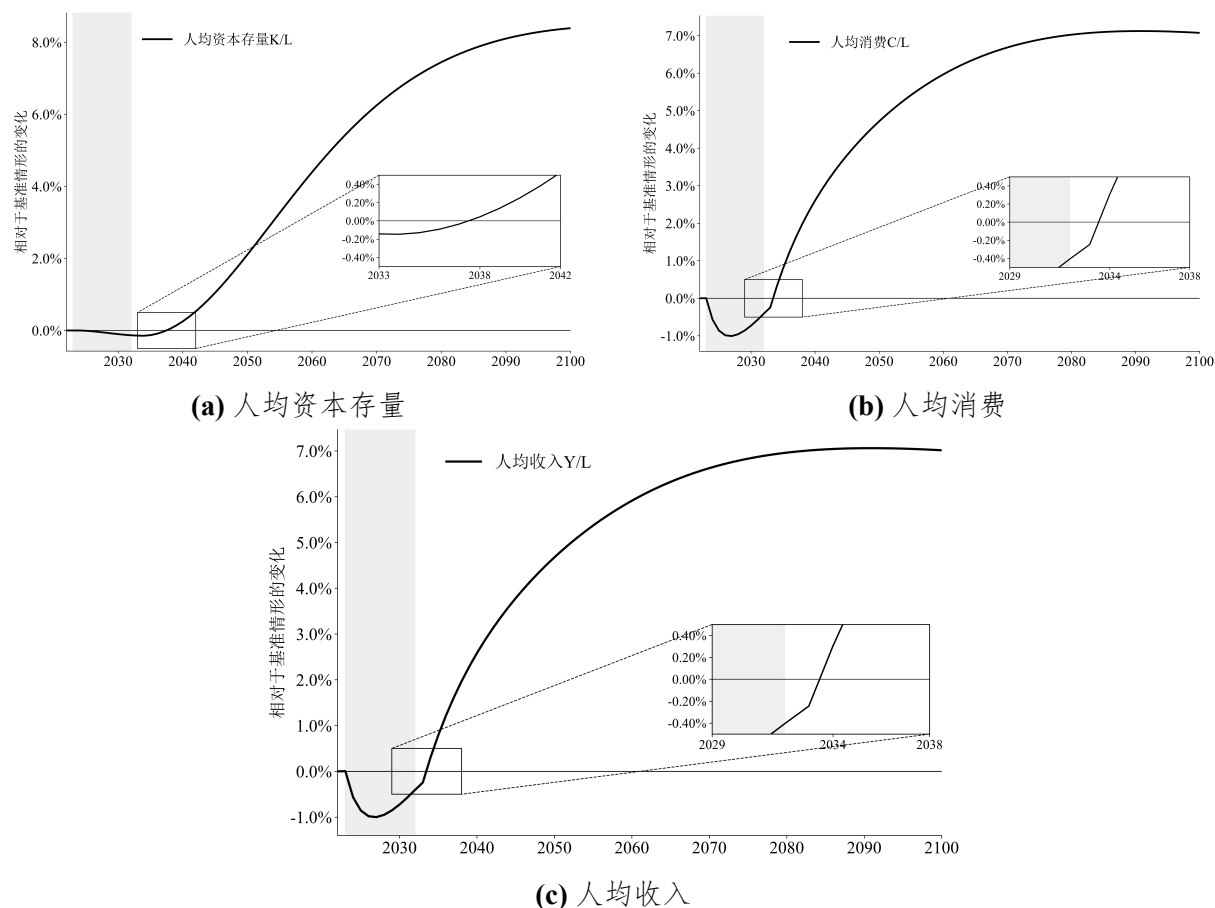


图 4 基准政策情形下研发再配置的动态效应

(二) 贸易成本上升情形

AI 生产依赖电子设备、数字服务和其他中间投入，贸易成本变化因而可能改变研发再配置的传导过程。为考察这一影响，本文分别设置贸易成本提高 20%、50% 和 100% 三种情形：在 2023–2032 年，将中国与其他地区之间的贸易成本逐步提高至基准水平的 1.2 倍、1.5 倍和 2 倍，并自 2033 年起维持相应水平不变。在每一种贸易成本情形下，研发再配置效应均由“贸易成本上升并实施研发再配置”与“仅提高相同幅度的贸易成本”两条路径之差衡量。

图 5、图 6 和图 7 报告不同贸易成本下研发再配置的边际效应。短期内，三种贸易成本情形与正常贸易环境下的结果较为接近；进入中期后，贸易成本越高，研发再配置带来的人均资本、人均消费和人均收入增幅越小。到 2050 年，贸易成本提高 20%、50% 和 100% 时，人均资本相对于各自基准路径的增幅约为 2.0%、1.9% 和 1.8%，人均消费增幅约为 4.7%、4.6% 和 4.4%，人均收入增幅约为 4.6%、4.5% 和 4.4%。这表明贸易成本上升会削弱研发再配置的中期边际收益。

随着 AI 知识持续积累，不同情形的路径逐步交叉。到 2100 年，贸易成本提高 20%、50% 和 100% 时，人均资本相对于各自基准路径分别提高约 8.7%、8.9% 和 9.0%，人均消费分别提高约 7.4%、7.7% 和 8.0%，人均收入分别提高约 7.3%、7.6% 和 7.9%。从模型机制看，贸易成本上升在中期抬高进口中间投入成本并限制市场范围，从而延缓 AI 研发收益的释放；在较长期内，国内 AI 知识积累和进口替代的相对价值上升，使研发再配置相对于高贸易成本基准路径的边际效应扩大。

需要指出的是，上述比较均以相同贸易成本下未实施研发再配置的路径为基准。因此，较高贸易成本下研发再配置的长期边际效应较大，并不意味着提高贸易成本能够改善中国的总体福利。

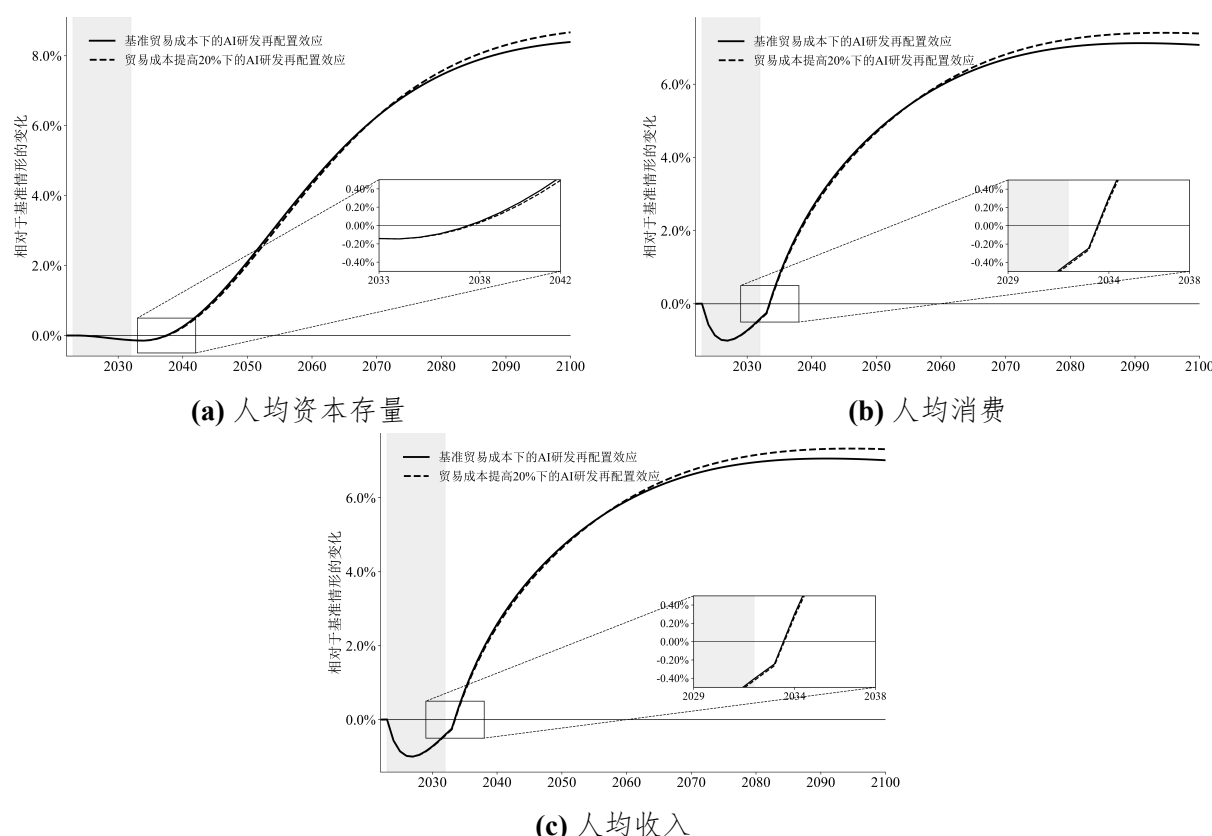


图 5 贸易成本提高 20% 时研发再配置的边际效应

(三) 劳动力供给下降情形

为考察劳动力供给变化是否会改变研发再配置的作用，本文以 2022 年中国劳动力规模为基准，参照 2021–2022 年约 1.4% 的降幅，设定 2023–2032 年每年减少相当于基期劳动力 1.4% 的劳动力供给，即每年约减少 1042 万人，并自 2033 年起将劳动力规模维持在 2032 年的水平。该设定表示劳动力每年减少固定的绝对数量，而不是按剩余劳动力规模复合下降 1.4%。

图 8 中，实线表示劳动力保持基准水平时的研发再配置效应，虚线表示劳动力下降时研发再配置相对于“仅劳动力下降”路径的边际效应。短期内，两种情形下人均资本、人均消费和人均收入的变化基本一致；进入中期后，劳动力下降情形下三项指标的增幅

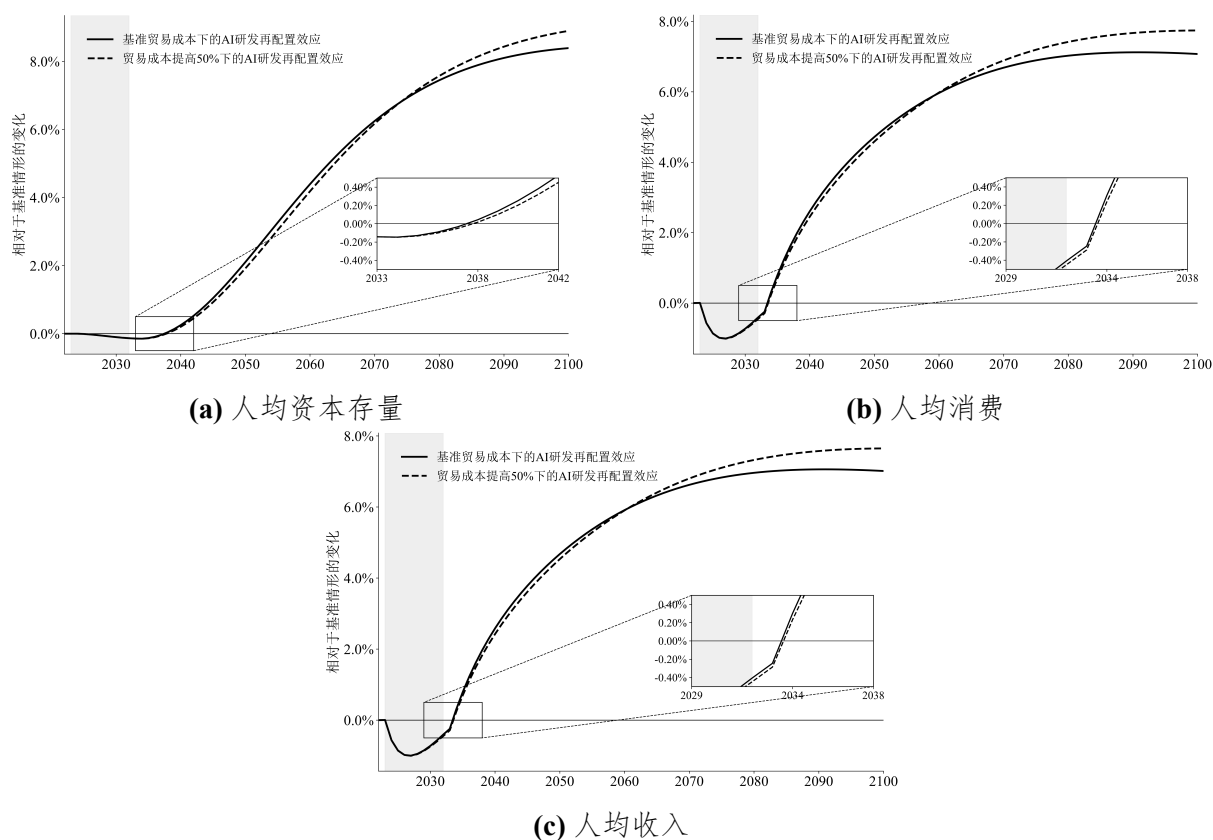


图 6 贸易成本提高 50% 时研发再配置的边际效应

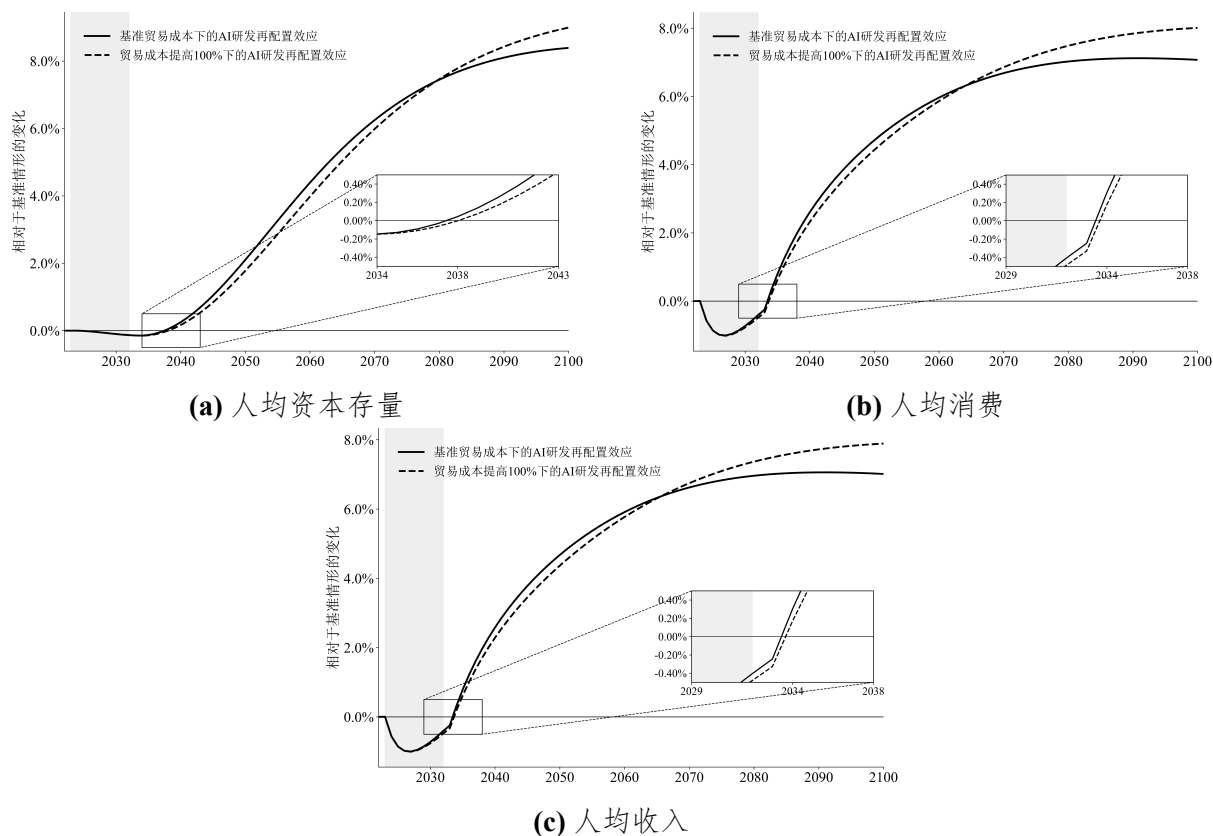


图 7 贸易成本提高 100% 时研发再配置的边际效应

略低。到 2050 年，人均资本、人均消费和人均收入分别比对应基准路径高约 1.9%、4.6% 和 4.6%，较劳动力不变情形低约 0.1–0.2 个百分点。此后差距逐步缩小，到 2100 年三项指标的差异均不足 0.1 个百分点。

在本文模型中，劳动力供给收缩会通过生产规模和资本积累轻微削弱研发再配置的中期边际收益，但不会中断 AI 知识存量及其跨部门溢出的累积过程，因而对长期边际效应的影响较小。这里的结论针对研发再配置的相对效应，并不意味着劳动力下降本身对经济总量没有影响。

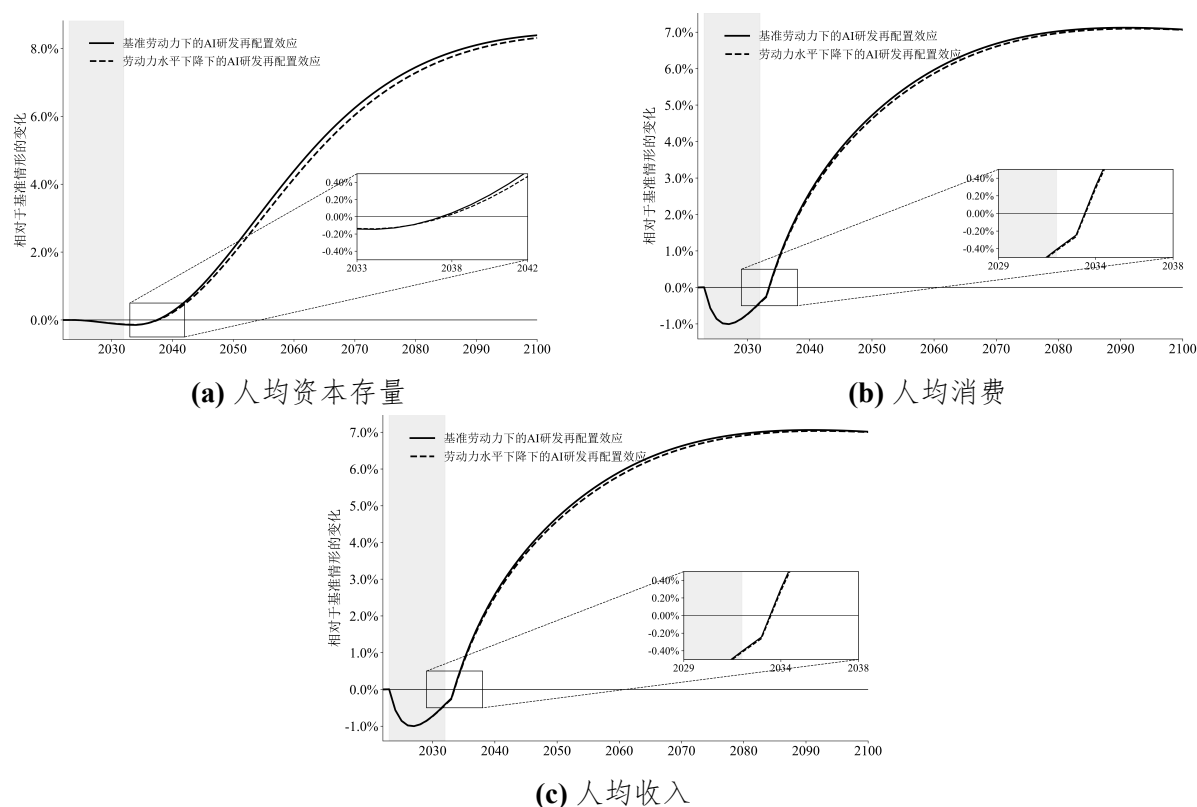


图 8 劳动力供给下降时研发再配置的边际效应

(四) 投资率下降情形

资本积累是技术进步影响长期经济表现的重要渠道。为考察资本形成条件变化对研发再配置效应的影响，本文设定中国投资率在 2023–2032 年期间每年下调 2 个百分点，并自 2033 年起维持在 2032 年的水平。

图 9 中，实线表示基准投资率下的研发再配置效应，虚线表示投资率下降时研发再配置相对于“仅投资率下降”路径的边际效应。短期内，两种投资率情形下的结果较为接近。投资率下降情形中的短期降幅略小，是由比较基准变化造成的相对结果，不能据此解释为降低投资率有利于短期经济表现。

随着时间推移，较低投资率对资本积累的约束逐步显现。到 2050 年，人均资本、人均消费和人均收入分别比对应基准路径高约 1.4%、4.5% 和 4.4%；其中，人均资本的增幅较正常投资率情形低约 0.7 个百分点，消费和收入的差距相对较小。到 2100 年，三项指标分别高约 8.1%、7.0% 和 7.0%，仍略低于基准投资率下的研发再配置效应。

从模型机制看，较低投资率限制了新增收入向资本形成的转化，使 AI 知识积累带来的生产率提高难以通过资本深化得到充分放大，因而对人均资本的影响最为明显。相比之下，知识积累及其跨部门溢出仍可持续发挥作用，人均消费和人均收入的长期边际收益受到的影响较小。总体而言，投资率下降削弱了资本积累的放大渠道，但未改变研发再配置长期边际效应的正方向。

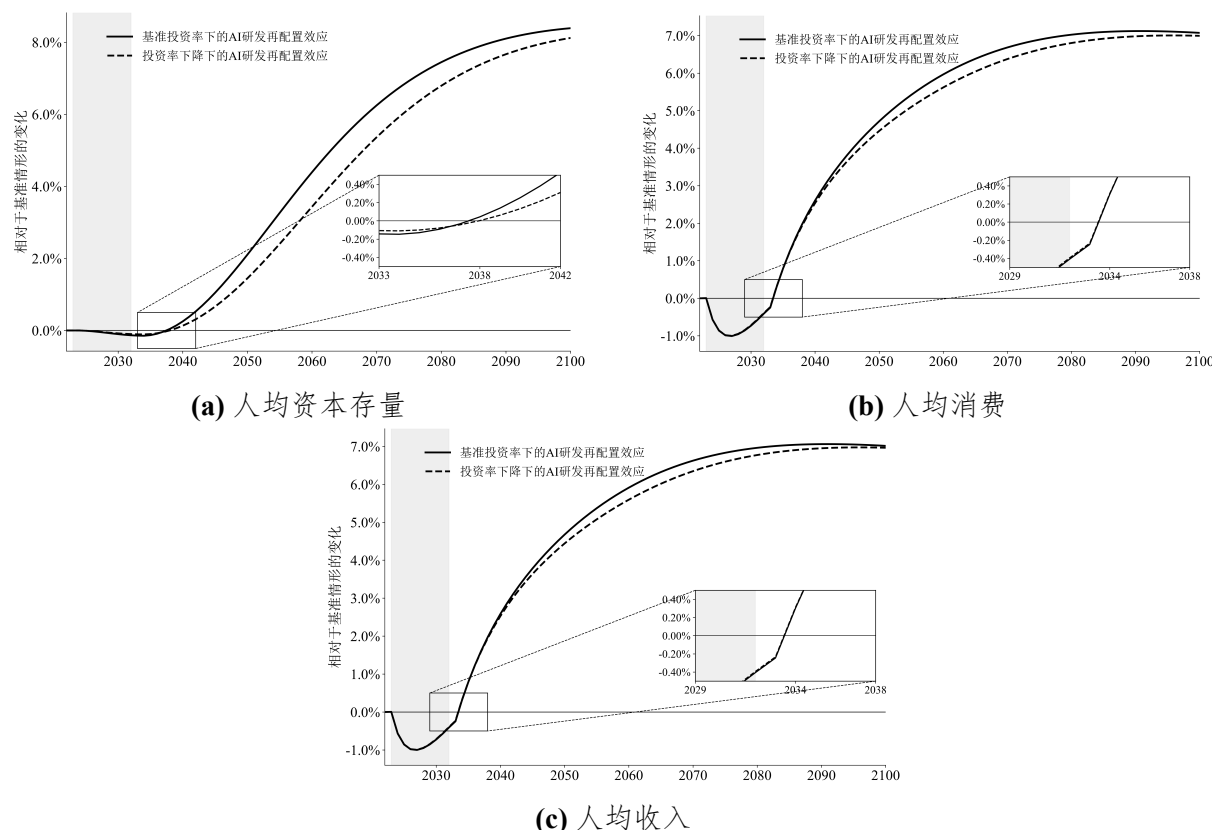


图 9 投资率下降时研发再配置的边际效应

综合上述反事实结果，研发资源向 AI 部门再配置具有“短期调整成本、长期累积收益”的动态特征，其边际效应会随贸易环境、劳动力供给和资本形成条件而变化。由于各组结果均来自特定情景参数，并以相应基准路径为比较对象，本文的模拟旨在揭示动态机制和数量级，而不直接给出最优研发配置比例，也不用于判断其他外生冲击本身是否提高福利。

七、政策启示

本文的政策启示在于，AI 研发政策应在非 AI 部门研发受到挤出的短期成本与 AI 知识积累和扩散的长期收益之间进行动态权衡。研发资源调整宜渐进推进，在支持 AI 基础研究和共性技术的同时，保留其他部门必要的创新与技术吸收能力，并通过分阶段实施和滚动评估及时调整配置节奏。政策重点也不应停留在扩大 AI 部门投入，而应改善 AI 知识向其他部门扩散和应用的条件。此外，AI 研发政策还需与开放环境、资本形成和人力资本政策相协调。鉴于本文没有求解最优研发配置和完整福利，未来研究可进

一步利用微观数据加强因果识别，并纳入企业、劳动者和家庭异质性，以期全面考察 AI 对经济和福利的影响。

参考文献

- [1] Acemoglu, D., “The Simple Macroeconomics of AI”, *Economic Policy*, 2025, 40(121), 13–58.
- [2] Acemoglu, D., and P. Restrepo, “Artificial Intelligence, Automation, and Work”, in Agrawal, A., J. Gans, and A. Goldfarb, *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*. Chicago: University of Chicago Press, 2019.
- [3] Aghion, P., and S. Bunel. “AI and Growth: Where Do We Stand?” Policy note. June 2024.
- [4] Aghion, P., B. F. Jones, and C. I. Jones, “Artificial Intelligence and Economic Growth”, in Agrawal, A., J. Gans, and A. Goldfarb, *The Economics of Artificial Intelligence: An Agenda*. Chicago: University of Chicago Press, 2019.
- [5] Allen, T., and C. Arkolakis, “Trade and the Topography of the Spatial Economy”, *Quarterly Journal of Economics*, 2014, 129(3), 1085–1140.
- [6] Babina, T., A. Fedyk, A. He, and J. Hodson, “Artificial Intelligence, Firm Growth, and Product Innovation”, *Journal of Financial Economics*, 2024, 151, 103745.
- [7] Bekkers, E., L. Humphreys, H. Kalachyhin, K. Wilczynska, and D. Zhao. *Through the looking glass: Artificial intelligence, international trade, and economic growth in the long run*. eng. WTO Staff Working Paper ERSD-2025-09. Geneva, 2025.
- [8] Beraja, M., D. Y. Yang, and N. Yuchtman, “Data-Intensive Innovation and the State: Evidence from AI Firms in China”, *Review of Economic Studies*, 2023, 90(4), 1701–1723.
- [9] Bianchini, S., M. Müller, and P. Pelletier, “Artificial Intelligence in Science: An Emerging General Method of Invention”, *Research Policy*, 2022, 51(10), 104604.
- [10] Broda, C., and D. E. Weinstein, “Globalization and the Gains From Variety”, *Quarterly Journal of Economics*, 2006, 121(2), 541–585.
- [11] Brynjolfsson, E., D. Li, and L. Raymond, “Generative AI at Work”, *Quarterly Journal of Economics*, 2025, 140(2), 889–942.
- [12] Brynjolfsson, E., D. Rock, and C. Syverson, “The Productivity J-Curve: How Intangibles Complement General Purpose Technologies”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2021, 13(1), 333–372.
- [13] Buera, F. J., and E. Oberfield, “The Global Diffusion of Ideas”, *Econometrica*, 2020, 88(1), 83–114.

- [14] Cai, J., N. Li, and A. M. Santacreu, “Knowledge Diffusion, Trade, and Innovation across Countries and Sectors”, *American Economic Journal: Macroeconomics*, 2022, 14(1), 104–45.
- [15] Cai, S., L. Caliendo, F. Parro, and W. Xiang. *Mechanics of Spatial Growth*. Tech. rep. National Bureau of Economic Research, 2022.
- [16] Caliendo, L., and F. Parro, “Estimates of the Trade and Welfare Effects of NAFTA”, *Review of Economic Studies*, 2015, 82(1), 1–44.
- [17] 陈斌开、张梓润、夏俊杰、陈思, “人工智能、经济增长与财富分配”, 《经济学(季刊)》, 2026 年第 3 期, 第 668–691 页。
- [18] Chen, W. X., T. T. Shi, and S. Srinivasan. *The Value of AI Innovations*. Working Paper 24-069. Harvard Business School, 2024.
- [19] 陈彦斌、林晨、陈小亮, “人工智能、老龄化与经济增长”, 《经济研究》, 2019 年第 7 期, 第 47–63 页。
- [20] 程文, “人工智能、索洛悖论与高质量发展: 通用目的技术扩散的视角”, 《经济研究》, 2021 年第 10 期, 第 22–38 页。
- [21] Cottier, B., R. Rahman, L. Fattorini, N. Maslej, T. Besiroglu, and D. Owen, “The rising costs of training frontier AI models”, *arXiv preprint arXiv:2405.21015*, 2024.
- [22] 董直庆、张潇、余淼杰, “知识生成之谜: 来自 AI 专利文本与引文信息的经验证据”, 《经济学(季刊)》, 2026 年第 3 期, 第 938–960 页。
- [23] Doraszelski, U., and J. Jaumandreu, “R&D and Productivity: Estimating Endogenous Productivity”, *Review of Economic Studies*, 2013, 80(4), 1338–1383.
- [24] Eaton, J., and S. Kortum, “International Technology Diffusion: Theory and Measurement”, *International Economic Review*, 1999, 40(3), 537–570.
- [25] Eaton, J., and S. Kortum, “Technology, Geography, and Trade”, *Econometrica*, 2002, 70(5), 1741–1779.
- [26] Felten, E., M. Raj, and R. Seamans, “Occupational, industry, and geographic exposure to artificial intelligence: A novel dataset and its potential uses”, *Strategic Management Journal*, 2021, 42(12), 2195–2217.
- [27] Gollin, D., “Getting Income Shares Right”, *Journal of Political Economy*, 2002, 110(2), 458–474.
- [28] 郭凯明, “人工智能发展、产业结构转型升级与劳动收入份额变动”, 《管理世界》, 2019 年第 7 期, 第 60–77 页。
- [29] 黄浩权、戴天仕、沈军, “人工智能发展、干中学效应与技能溢价——基于内生技术进步模型的分析”, 《中国工业经济》, 2024 年第 2 期, 第 99–117 页。

- [30] Jones, C. I., “R&D-Based Models of Economic Growth”, *Journal of Political Economy*, 1995, 103(4), 759–784.
- [31] Jones, C. I., “The Past and Future of Economic Growth: A Semi-Endogenous Perspective”, *Annual Review of Economics*, 2022, 14, 125–152.
- [32] Kortum, S. S., “Research, Patenting, and Technological Change”, *Econometrica*, 1997, 1389–1419.
- [33] 李玉花、林雨昕、李丹丹, “人工智能技术应用如何影响企业创新”, 《中国工业经济》, 2024 年第 10 期, 第 155–173 页。
- [34] 刘青、肖柏高, “劳动力成本与劳动节约型技术创新——来自 AI 语言模型和专利文本的证据”, 《经济研究》, 2023 年第 2 期, 第 74–90 页。
- [35] Perla, J., C. Tonetti, and M. E. Waugh, “Equilibrium Technology Diffusion, Trade, and Growth”, *American Economic Review*, 2021, 111(1), 73–128.
- [36] Simonovska, I., and M. E. Waugh, “The elasticity of trade: Estimates and evidence”, *Journal of International Economics*, 2014, 92(1), 34–50.
- [37] Sposi, M., K.-M. Yi, and J. Zhang, “The Role of Trade in Premature Deindustrialization and Industry Polarization”, *Econometrica*, 2026, forthcoming.
- [38] UNCTAD, *Technology and Innovation Report 2025: Inclusive Artificial Intelligence for Development*, 2025.
- [39] 肖柏高、周阳、刘青, “生成式 AI 驱动创新的数量和质量效应——基于诺贝尔化学奖成果 AlphaFold 的发现”, 《经济学 (季刊)》, 2026 年第 3 期, 第 733–752 页。
- [40] Zacchia, P., “Knowledge Spillovers through Networks of Scientists”, *Review of Economic Studies*, 2020, 87(4), 1989–2018.