

一、附录部分

（一）附录 1 模型构建与推演

1. 基本假设

假设区域由生产同质产品的农业部门和生产差异化产品的非农业部门组成，其中农业部门需要普通工人，而非农业部门需要高技能工人。区域为狭长形态，高技能工人以 CBD 为中心向两侧居住，每单位高技能工人消耗 1 单位土地，则 λ_r 单位高技能工人的区域范围为 $[-\lambda_r/2, \lambda_r/2]$ 。

对于居民而言，考虑两种空间成本，第一种是居民在区域内部居住所需支付的通勤成本和住房成本，第二种是商品跨区域流动所需支付的交通成本。假设非农业部门的经济活动集中于中心区域，而农业部门的活动分布于边缘区域。因此，高技能工人到 CBD 区域工作需要同时考虑通勤成本和住房成本，假设通勤成本与工作距离线性相关，则与 CBD 距离为 x 处的高技能工人所需付出的通勤成本为 θx ，其中 $\theta \geq 0$ 。假设越远离 CBD 区域的住房成本越低，住房成本 $R(x)$ 与工作距离负相关，则与 CBD 距离为 x 处的高技能工人所需支付的总成本为 $UC(r) = R(x) + \theta x$ 。进一步，假设区域内部土地的机会成本为 0，当土地市场均衡时，区域内部所有位置的通勤成本与住房成本之和均相等。此时，与 CBD 距离为 x 处的高技能工人的住房成本 $R(x) = \theta(\lambda_r/2 - x)$ ，总成本 $UC(r) = \theta\lambda_r/2$ 。基于上述假设，高技能工人越靠近 CBD 区域，住房成本越高，通勤成本降低；随着区域人口的增加，区域内部拥挤度提高，居民住房成本不断增加；通勤成本随距离的增加而增长，当区域内基础设施逐步完善，或工人的工作不再需要长距离通勤时，则通勤成本会大幅下降。

对于商品而言，遵循新经济地理学的一般思路，假设商品在本地区销售没有成本，而跨区域销售时存在冰山成本，即 $\tau > 1$ 单位的商品在跨区域销售时，最终只能留下 1 单位商品， $\tau - 1$ 单位商品在过程中损耗， τ 为商品的损耗系数。

2. 消费者行为

假设消费者具有相同的偏好，则其效用函数可以表示为：

$$U = \alpha \ln C_M + C_A, C_M = \left(\int_{i=0}^{\lambda} x_i^{1-1/\sigma} di + \int_{j=0}^{1-\lambda} x_j^{1-1/\sigma} dj \right)^{\sigma/(\sigma-1)} \quad (1)$$

其中， C_M 为 CES 函数，表示对异质性非农业产品的消费组合， C_A 则是对农产品的消费组合。 α 表示消费者对异质性非农业产品的偏好， $\sigma > 1$ 表示非农业产品的替代弹性系数。假设两区域的产业份额与熟练劳动力份额的总和均为 1，则 λ 表示区域 1 的产业份额（熟练劳动力份额）， $1-\lambda$ 表示区域 2 的产业份额（熟练劳动力份额）。假设不存在储蓄行为，且高技能工人的支出和收入相等，则预算约束为：

$$P_M C_M + C_A + UC = Y, P_M = \left(\int_{i=0}^{\lambda} p_i^{1-\sigma} di + \int_{j=0}^{1-\lambda} (\tau p_j)^{1-\sigma} dj \right)^{1/(1-\sigma)} \quad (2)$$

其中， Y 代表消费者的总支出。 P_M 是非农业商品的总体价格指数，区域 1 生产的商品在本地价格为 p_i ，区域 2 生产的商品在本地价格为 p_j 。由于存在冰山运输成本，区域 1 消费者消费区域 2 的商品价格则为 τp_j 。因此，高技能工人对农业品和非农业品的消费量为：

$$C_M = \alpha / P_M, \quad C_A = Y - UC - \alpha, \quad x_i = \alpha (p_i)^{-\sigma} P_M^{\sigma-1}, \quad x_j = \alpha (\tau p_j)^{-\sigma} P_M^{\sigma-1} \quad (3)$$

区域的多中心结构主要由产业布局与高技能工人的迁移行为共同决定，而这取决于地区间的效用差异。根据效用最大化的条件，消费者的实际效用水平为：

$$V = Y - UC - \alpha \ln P_M - \alpha (\ln \alpha - 1) \quad (4)$$

由此可知，高技能工人的效用水平主要由收入水平、区域内部居住成本、商品贸易成本和商品价格指数共同决定。

3. 生产者行为

假设农业部门生产同质化产品，完全竞争且规模报酬不变，且每单位非熟练劳动力生产 1 单位农产品，其工资水平 $w=1$ 。非农业部门生产异质性产品，垄断竞争且规模报酬递增，每生产 1 单位商品需要 c 单位农产品作为边际成本。与已有研究不同，本文进一步考虑数字技术水平 (η) 对生产者行为的影响。假设区域 1 为核心区域，其数字技术水平相对较高，非农业部门的劳动生产率也相对较高，则所需要的高技能工人数量相对较少，在利润一定的情况下，高技能工人的收益则相对加高。令区域生产所需的高技能工人数量 $L(\eta) = F_0/\eta$ ， F_0 表示固定投入的工人数量，因此每生产 1 单位非农业产品需要 F_0/η 单位熟练劳动力，熟练劳动力的收入水平与数字化水平正相关，为简化分析取 $F_0=1$ 。因此，令成本函数为 $TC=R+cX_ip_A$ ， R 为高技能工人的收入， X_i 为企业 i 生产的产品数量， p_A 为农产品价格。企业 i 生产的产品数量为：

$$Xi = (\rho_1 + \lambda)x_{i1} + (\rho_2 + 1 - \lambda)\tau x_{i2} \quad (5)$$

其中， ρ_1 和 ρ_2 分别代表两区域非高技能工人的数量， x_{i1} 代表区域 1 消费者对本地商品的消费量， x_{i2} 代表区域 2 消费者对区域 1 商品的消费量。因此，企业的超额利润函数为：

$$\prod_i = (p_{i1} - c)(\rho_1 + \lambda)x_{i1} + (p_{i2} - c)(\rho_2 + 1 - \lambda)\tau x_{i2} - R/\eta \quad (6)$$

根据利润最大化原则，令企业的超额利润为 0，则高技能工人的收入为：

$$R = \frac{\alpha\eta c}{(\sigma-1)} [(\rho_1 + \lambda)x_{i1} + (\rho_2 + 1 - \lambda)\tau x_{i2}] \quad (7)$$

进一步假设贸易自由度 (φ) 受运输成本与信息成本的双重影响，在传统的运输成本既定情况下，数字技术越发达时，信息搜集的成本就越小，贸易自由度也就越高。设 $0 < \varphi = e^{(1-\sigma)/\eta} \leq 1$ ，因此，贸易自由度与运输成本负相关，而与数字技术水平正相关。两区域的非农业品价格指数为：

$$P_{M1} = [\lambda + (1 - \lambda)\varphi]^{1/(1-\sigma)}, \quad P_{M2} = [\lambda\varphi + (1 - \lambda)]^{1/(1-\sigma)} \quad (8)$$

为简化分析，令 $c = (\sigma-1)/\sigma$ ，则产品的出厂价 $p_{i1}=p_{i2}=1$ 。结合式 (3)、式 (5)、式 (7)、式 (8)，则高技能工人在两区域的收入水平为：

$$R_1 = \eta \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{\rho_1 + \lambda}{\lambda + (1 - \lambda)\varphi} + \frac{\varphi(\rho_2 + 1 - \lambda)}{\lambda\varphi + (1 - \lambda)} \right], \quad R_2 = \eta \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{\varphi(\rho_1 + \lambda)}{\lambda + (1 - \lambda)\varphi} + \frac{\rho_2 + 1 - \lambda}{\lambda\varphi + (1 - \lambda)} \right] \quad (9)$$

区域 1 高技能工人的福利水平为：

$$\begin{aligned} V_1 &= R_1 - UC_1 - \alpha \ln P_{M1} - \alpha(\ln \alpha - 1) \\ &= \eta \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{\rho_1 + \lambda}{\lambda + (1-\lambda)\varphi} + \frac{\varphi(\rho_2 + 1 - \lambda)}{\lambda\varphi + (1-\lambda)} \right] - \frac{\theta}{2}\lambda + \frac{\alpha}{\sigma-1} \ln[\lambda + (1-\lambda)\varphi] - \alpha(\ln \alpha - 1) \end{aligned} \quad (10)$$

区域 2 高技能工人的福利水平为：

$$\begin{aligned} V_2 &= R_2 - UC_2 - \alpha \ln P_{M2} - \alpha(\ln \alpha - 1) \\ &= \eta \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{\varphi(\rho_1 + \lambda)}{\lambda + (1-\lambda)\varphi} + \frac{\rho_2 + 1 - \lambda}{\lambda\varphi + (1-\lambda)} \right] - \frac{\theta}{2}(1-\lambda) + \frac{\alpha}{\sigma-1} \ln[\varphi\lambda + (1-\lambda)] - \alpha(\ln \alpha - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

因此，两区域的效用水平差距为：

$$\begin{aligned} V_1 - V_2 &= \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{(\eta - \eta\varphi)(\rho_1 + \lambda)}{\lambda + (1-\lambda)\varphi} + \frac{(\eta\varphi - \eta)(\rho_2 + 1 - \lambda)}{\lambda\varphi + (1-\lambda)} \right] + \frac{\alpha}{\sigma-1} \ln \frac{\lambda + (1-\lambda)\varphi}{\lambda\varphi + (1-\lambda)} - \theta\lambda + \frac{\theta}{2} \\ &= \frac{\alpha}{\sigma} \left[\frac{(\eta - \eta e^{\tau(1-\sigma)/\eta})(\rho_1 + \lambda)}{\lambda + (1-\lambda)e^{\tau(1-\sigma)/\eta}} + \frac{(\eta e^{\tau(1-\sigma)/\eta} - \eta)(\rho_2 + 1 - \lambda)}{\lambda e^{\tau(1-\sigma)/\eta} + (1-\lambda)} \right] \\ &\quad + \frac{\alpha}{\sigma-1} \ln \frac{\lambda + (1-\lambda)e^{\tau(1-\sigma)/\eta}}{\lambda e^{\tau(1-\sigma)/\eta} + (1-\lambda)} - \theta\lambda + \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

根据前文，城市空间结构由其产业布局决定，而企业的区位选择受到集聚力与分散力两种力量组成，式中前两项为集聚力量，分别是本地市场效应和价格指数效应；后两项为分散力量，分别市场竞争效应和空间成本效应。

4. 长期均衡

企业的布局受高技能工人数量的影响，而高技能工人依据效用水平的高低在区域间流动，只有高技能工人在不同区域的效应稳定时达到均衡。因此，设高技能工人的区位调整方程为 $d\lambda/dt = \lambda(1-\lambda)(V_1 - V_2)$ 。当 $d\lambda/dt = 0$ 时，高技能工人不再因效用差异而流动，此时高技能工人的选择达到均衡，企业的区位选择也达到均衡状态。

在长期均衡状态下，本文参考现有文献的参数设置方法，利用 MATLAB 软件进行数值模拟分析，分析在不同的数字经济水平下，区域一体化程度水平与多中心空间结构的关系。以 τ 表示区域一体化水平，以遍历的方式在 0~1 之间取值， τ 与贸易自由度负相关， τ 越小，则贸易自由度越高，因此区域一体化水平越高；以产业份额表示区域的空间结构，若两区域的产业份额趋于相等，则呈现多中心空间结构，反之则为单中心空间结构。

（二）附录 2 区域经济差距测算方法

$$\begin{aligned}
T &= \frac{1}{n} \sum_i \sum_j \sum_k \frac{y_{ijk}}{\mu} \log \frac{y_{ijk}}{\mu} \\
&= \frac{1}{n_{ij}} \sum_i \sum_j \frac{n_{ij} \mu_{ij}}{n \mu} \sum_k \frac{y_{ijk}}{\mu_{ij}} \log \frac{y_{ijk}}{\mu_{ij}} + \sum_i \frac{n_i \mu_i}{n \mu} \sum_j \frac{n_{ij} \mu_{ij}}{n_i \mu_i} \log \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} + \sum_i \frac{n_i \mu_i}{n \mu} \log \frac{\mu_i}{\mu} \\
&= \sum_i \sum_j \frac{n_{ij} \mu_{ij}}{n \mu} T_{ij} + \sum_i \frac{n_i \mu_i}{n \mu} \sum_j \frac{n_{ij} \mu_{ij}}{n_i \mu_i} \log \frac{\mu_{ij}}{\mu_i} + \sum_i \frac{n_i \mu_i}{n \mu} \log \frac{\mu_i}{\mu} \\
&= T_{WC} + T_{BC} + T_{BR} \\
T_{ij} &= \frac{1}{n_{ij}} \sum_k \left(\frac{y_{ijk}}{\mu_{ij}} \right) \log \left(\frac{y_{ijk}}{\mu_{ij}} \right)
\end{aligned} \tag{13}$$

其中， n 为行政单元数量， y 为夜间灯光亮度， μ 为夜间灯光亮度的均值，下标 i 、 j 和 k 分别对应城市群 i ，城市 j 和县域 k 。 T 为总体经济差距， T_{WC} 为城市内经济差距， T_{BC} 为城市间经济差距， T_{BR} 为城市群间经济差距。 T_{ij} 为城市内真实经济差距，若以城市夜间灯光亮度占全国夜间灯光亮度之比为权重进行加权处理，则为加权的城市内经济差距 (T_{WC})。

（三）附录 3 数字经济评价指标体系

综合参考已有研究与数据可得性基础上，遵循于中国信息通信研究院提出的数字经济“四化”原则，从数据价值化、数字产业化、产业数字化、数字化治理四个维度构建数字经济评价体系，具体指标及数据来源见附表 3。

目前关于数据价值化的统计指标相对匮乏，本文从数据要素的应用价值出发，以数据基础设施发展水平考察数据价值化水平，相关指标来源于历年城市统计年鉴。

以电信业务发展水平与数字相关产业上市公司数量衡量数字产业化水平。在数字相关产业上市公司数量的处理中，首先按照《数字经济及其核心产业统计分类（2021）》的界定标准，以“计算机、通信业”、“电信、广播电视和卫星传输”、“互联网和相关服务”、“软件和信息技术服务”等 4 个行业表征数字经济核心产业；其次，以 2012—2023 年为样本考察期，剔除掉 2023 年前退市的公司，将 2012 年之前的上市公司数量归至 2012 年；最后，根据上市公司所在地，将其归纳加总至城市层面，获得城市尺度上的数字产业化发展水平。

以企业数字化转型和普惠金融发展水平衡量产业数字化程度。其中，普惠金融指数来源于《北京大学数字普惠金融指数（2011-2021 年）》，2021 年之后的结果，参考郭峰等（2020）的方法计算得出。参考吴非等（2021）的研究，从人工智能技术、区块链技术、云计算技术、大数据技术和数据技术应用等 5 个维度，结合 Python 工具以及“文本挖掘法”统计了 A 股上市公司年报中相关词条出现的频率，并采取与前文相似的处理方法，获得城市层面企业数字化转型指数。

以地级市政府数字关注度表征数字化治理水平。参考阮霁阳（2022）的研究，采用“文本挖掘法”采集了各地级市政府工作报告中 121 个关键词出现的词频，从而生成政府数字关注度指数，相关数据来源于政府工作报告和北大法宝数据库等。

在此基础上，参考杨丽和孙之淳（2015）的做法，在传统的熵值法基础上加入时间变量，评价各城市的数字经济发展水平，从而解决不同年份间跨期不可比的问题。

二、附表部分

附表 1

稳健性检验结果

| 变量 | 截面PSM (1) | 逐年PSM (2) | 智慧城市 (3) | 国家大数据综合试验区 (4) | CSDID (5) |
|---------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| DID | -0.0246*** (0.0080) | -0.0232*** (0.0080) | -0.0161*** (0.0049) | -0.0259 *** (0.0079) | |
| SC | | | -0.0057 (0.0096) | | |
| NBD | | | | -0.0002 (0.0061) | |
| 平均处理效应 | | | | | -0.0263*** (0.0095) |
| 控制变量 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 固定城市 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 固定年份 | 是 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 样本量 | 3351 | 3277 | 2832 | 3408 | 3408 |
| adj. R ² | 0.9646 | 0.9639 | 0.9605 | 0.9648 | / |

附表 2

替换变量检验

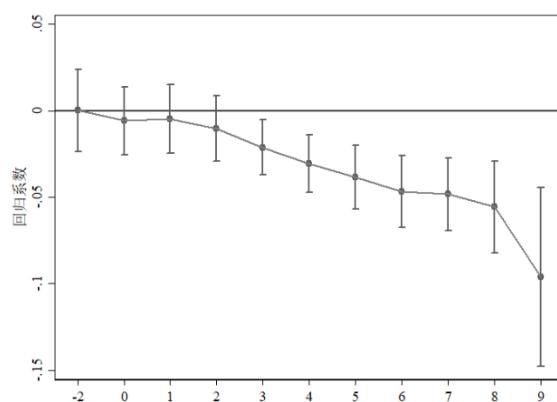
| 变量 | 真实经济差距 (1) | 剔除地形因素 (2) | 赫芬达尔指数 (3) | 数字经济指数 (4) |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| DID | -0.0136*** (0.0047) | -0.0202*** (0.0064) | -0.0073*** (0.0028) | |
| DE | | | | -0.8245*** (0.1977) |
| 控制变量 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 固定城市 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 固定年份 | 是 | 是 | 是 | 是 |
| 样本量 | 3408 | 3408 | 3408 | 3408 |
| adj. R ² | 0.9656 | 0.8635 | 0.9657 | 0.9666 |

附表 3

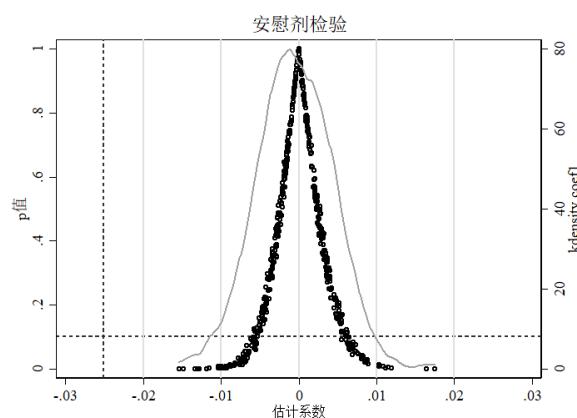
数字经济指标体系

| 一级指标 | 二级指标 | 具体指标 | 来源 |
|-------|------------|-------------------------|-----------------------|
| 数据价值化 | 数字基础设施 | 移动电话数 | 中国城市统计年鉴 |
| | | 国际宽带数 | |
| 数字产业化 | 电信业务发展 | 电信业务总量 | 中国城市统计年鉴 |
| | | 信息传输、计算机服务和软件业从业 人员数 | |
| 产业数字化 | 数字产业上市公司数量 | 计算机、通信业 | 中国研究数据服务平台 (CNRDS) |
| | | 电信、广播电视和卫星传输 | |
| | 企业数字化转型 | 互联网和相关服务 | |
| | | 软件和信息技术服务 | |
| | 数字普惠金融 | 人工智能技术 | 文本挖掘 |
| | | 区块链技术 | |
| | 数字普惠金融 | 云计算技术 | |
| | | 大数据技术 | |
| | 政府数字关注度 | 数据技术应用 | |
| | | 数字金融覆盖广度 | 北京大学数字普惠金融 指数 |
| | 政府数字关注度 | 数字金融使用深度 | |
| | | 普惠金融数字化程度 | |
| 数字化治理 | 政府数字关注度 | 政府数字关注度 | 文本挖掘 |

三、附图部分



附图 1 平行趋势假设评估



附图 2 安慰剂检验

参考文献：

- [1] 郭峰, 王靖一, 王芳, 等. 测度中国数字普惠金融发展:指数编制与空间特征[J]. 经济学 (季刊), 2020, 19 (4): 1401-1418.
- [2] 阮霁阳. 数字政府建设影响因素研究——基于 127 份政策文件的大数据分析[J]. 西南民族大学学报 (人文社会科学版), 2022, 43 (4): 185-191.
- [3] 吴非, 胡慧芷, 林慧妍, 等. 企业数字化转型与资本市场表现——来自股票流动性的经验证据[J]. 管理世界, 2021 (7): 130-144.
- [4] 杨丽, 孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题, 2015 (3): 115-119.