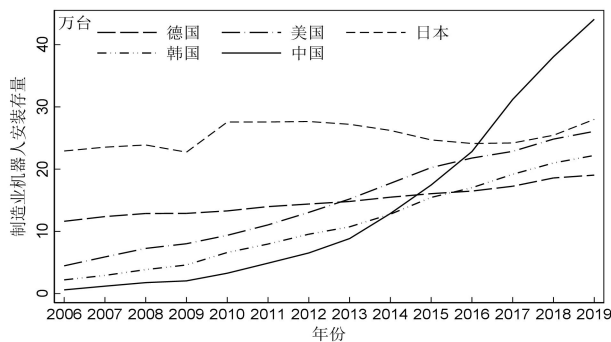
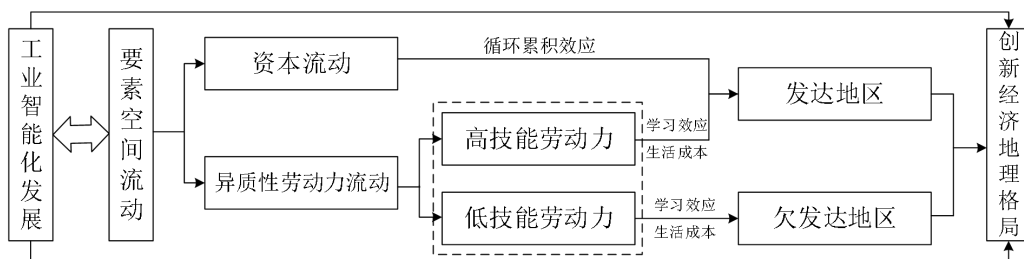


《工业智能化、要素流动与创新经济地理格局》补充材料

附图：



附图 1 2006-2019 年主要国家制造业机器人安装存量



附图 2 工业智能化与要素流动互动效应对创新经济地理格局的影响机制

附图：

二、理论模型与研究假说

(一) 基本假设

假设经济体系有生活服务部门和最终产品生产部门、发达地区 1 和欠发达地区 2。遵循新经济地理的基本假设，产品在区域间具有冰山运输成本 τ ($\tau > 1$)，生活服务部门的服务全部由低技能劳动力提供，且该部门低技能劳动力在区际之间均匀分布。最终产品生产投入资本、高技能劳动力 a_h 和低技能劳动力 a_l ，定义 $a_l \in [0, a_m)$ ， $a_h \in [a_m, \infty)$ ， a_m 是高技能与低技能劳动力的分界点。最终产品部门的资本和异质性劳动力在区域之间自由流动。借鉴王书斌（2020）的做法，假设生产函数中包含普通物质资本 (F_k) 和智能物质资本 (I_k)，以智能资本投入总量表征工业智能化发展水平。企业生产使用的普通物质资本 F_k 作为固定投入，每单位产出需要 a_l 单位低技能劳动力和 a_h 单位高技能劳动力作为可变投入。其中，投入的智能资本 I_k 对低技能劳动力形成替代，假设 β ($\beta > 0$) 为一单位智能资本投入对低技能劳动力的替代系数，智能资本对低技能劳动力的替代数量可表示为 $\beta \cdot I_k$ ^①。新资本的形成存在

^①事实上，智能资本对低技能劳动力的替代并不完全是线性的，对于不同的生产任务可能会存在生产替代的临界值（Acemoglu 和 Autor，2011），但考虑到简化模型推演，本着反映事实本质的原则，参考王书

路径依赖，考虑到资本的空间流动性，假设资本存量较多的地区，资本形成成本相对较低，越有利于该地区的新资本形成，该设定符合新经济地理学中规模报酬递增的假设（王书斌，2020）。

（二）消费者行为

消费者消费最终产品和服务部门提供的服务（不可贸易）。沿用新经济地理学模型的设定，消费者对于最终产品和服务的消费遵循柯布一道格拉斯效用函数：

$$U = \varepsilon e^{-R} C_M^\mu C_H^{1-\mu} \quad (1)$$

其中， U 表示消费者效用， C_M 表示最终产品消费组合指数， C_H 表示生活服务消费数量， μ 为消费最终产品的收入占比。此外，消费者区位选择受个人偏好影响，进而影响其实际效用。因此，在消费者效用函数中加入特质性冲击 ε 表征偏好，劳动力在空间中流动面临的迁移摩擦为 e^{-R} 。最终产品消费以不变替代弹性函数表示：

$$C_M = \left(\int_0^n c(i)^{\frac{1-\frac{1}{\sigma}}}{di} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (2)$$

其中， $c(i)$ 表示第 i 种最终产品的消费量， σ 是最终产品之间的替代弹性， $\sigma > 1$ ， n 为最终产品的种类。

（三）生产者行为

企业利润函数可表示为：

$$\pi = p_m x - (F_K + I_K)r - a_h x w_h - (a_l x - \beta I_K) w_l \quad (3)$$

其中， r 为资本形成成本， w_h 和 w_l 分别表示高技能劳动力和低技能劳动力的工资水平。根据生产者利润最大化可推导得出最终产品的价格 p_m ：

$$p_m = \frac{\sigma}{\sigma-1} (a_h w_h + a_l w_l) \quad (4)$$

当最终产品市场达到均衡时，需求与供给相等，企业利润为零。可求得均衡时的最终产品需求函数：

$$x = \frac{(F_K + I_K)r - \beta I_K w_l}{a_h w_h + a_l w_l} (\sigma - 1) \quad (5)$$

（四）决定资本要素空间流动的作用力及均衡分析

资本收益可表示为：

$$\frac{p_m x}{\sigma} = \frac{\mu \varphi_m^{1-\sigma}}{\sigma} (E_1 P_{M1}^{-(1-\sigma)} + E_2 \tau^{1-\sigma} P_{M2}^{-(1-\sigma)}) \quad (6)$$

区域 1 和区域 2 的资本收益方程：

$$\pi_{K1} = (F_K + I_{K1})r_1 = \frac{\mu E}{\sigma n} \left[\frac{s_E}{s_n + \phi(1-s_n)} + \frac{\phi(1-s_E)}{\phi s_n + (1-s_n)} \right] + \beta I_{K1} w_{l1} \quad (7)$$

$$\pi_{K2} = (F_K + I_{K2})r_2 = \frac{\mu E}{\sigma n} \left[\frac{\phi s_E}{s_n + \phi(1-s_n)} + \frac{1-s_E}{\phi s_n + (1-s_n)} \right] + \beta I_{K2} w_{l2} \quad (8)$$

其中， s_E 和 s_n 分别表示区域 1 的收入份额和市场份额。区域间企业资本收益差异决定了资本流动趋势，令 $\Delta_1 = s_n + \phi(1-s_n)$ ， $\Delta_2 = \phi s_n + 1 - s_n$ 。

斌（2020）的思路，假设智能资本与低技能劳动力之间是线性替代关系。

(五) 决定异质性劳动力空间流动的作用力分析

劳动力的工资用于消费最终产品和服务，消费者（劳动力）面临的预算约束为：

$$\int_0^n p_m(i)c(i)di + p_H C_H \leq w \tag{9}$$

由消费者效用最大化可求得最终产品消费需求和生活服务需求，进而得到消费者在区域 1 和区域 2 的间接效用函数 V_1 、 V_2 ：

$$V_1 = \varepsilon e^{-R} \left(\frac{\mu a t \bar{z}_c I_k^\xi}{P_{M1}} \right)^\mu \cdot \left[\frac{(1-\mu) a t \bar{z}_c I_k^\xi}{P_{H1}} \right]^{1-\mu} \tag{10}$$
$$V_2 = \varepsilon e^{-R} \left(\frac{\mu a}{P_{M2}} \right)^\mu \cdot \left[\frac{(1-\mu) a}{P_{H2}} \right]^{1-\mu}$$

附表：

附表 1		变量描述性统计				
Variable Type	Variable	N	Max	Min	Mean	Sd
被解释变量	区域创新	2176	4.700	0	0.0800	0.270
解释变量	工业智能化	2176	12.69	0.070	2.110	1.710
	资本流动	2176	2.980	-8.830	-0.090	0.490
	高技能劳动力流动	2176	15.99	0	12.50	2.371
	低技能劳动力流动	2176	18.44	12.09	14.98	0.698
控制变量	科教支出取对数	2176	16.49	9.430	13.05	0.860
	第三产业占比	2176	0.810	0.100	0.400	0.100
	百万人在校大学生数	2176	0.130	0	0.020	0.020
	GDP 取对数	2176	19.60	12.76	16.45	0.960
	移动电话用户	2176	4.080	0.040	0.460	0.480
	财政收支水平	2176	1.320	0.010	0.160	0.110
	消费品零售总额取对数	2176	18.66	12.51	15.55	1.020
	人口密度	2176	7.880	1.630	5.750	0.920

附表 2		稳健性检验：剔除直辖市、缩尾处理						
变量	区域创新							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
工业智能化×资本流动		0.0055** (2.4053)				0.0049** (2.3503)		
资本流动		-0.0049 (-0.7886)				-0.0041 (-0.7193)		
工业智能化×高技能劳动力流动			0.0030*** (3.6488)				0.0027*** (3.4354)	
高技能劳动力流动			-0.0047** * (-4.7932)				-0.0043** * (-4.7519)	
工业智能化×低技能劳动力流动				0.0182*** (3.2577)				0.0183*** (3.2838)
低技能劳动力流动				-0.0213** * (-2.8879)				-0.0193*** (-2.7338)

工业智能化	0.0489*** (4.6804)	0.0494*** (14.6383)	0.0098 (0.8693)	-0.2184** * (-2.7041)	0.0433*** (4.6813)	0.0437*** (14.1655)	0.0074 (0.6531)	-0.2251*** (-2.7579)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
<i>N</i>	1614	1614	1614	1614	1632	1632	1632	1632
adj. <i>R</i> ²	0.3136	0.1798	0.3279	0.3451	0.2973	0.1602	0.3118	0.3370

附表 3

稳健性检验：更换区域创新能力测度方法

变量	专利授权总量			
	(1)	(2)	(3)	(4)
工业智能化×资本流动		0.0484*** (2.9950)		
资本流动		-0.0749* (-1.7058)		
工业智能化×高技能劳动力流动			0.0148*** (2.7685)	
高技能劳动力流动			-0.0222*** (-3.6248)	
工业智能化×低技能劳动力流动				0.0617*** (3.8565)
低技能劳动力流动				-0.1023** (-2.2834)
工业智能化	0.2317*** (3.4151)	0.2357*** (9.9497)	0.0370 (0.4799)	-0.6761*** (-2.8598)
控制变量	Y	Y	Y	Y
时间固定效应	Y	Y	Y	Y
城市固定效应	Y	Y	Y	Y
<i>N</i>	1632	1632	1632	1632
adj. <i>R</i> ²	0.2486	0.1027	0.2553	0.1060

附表 4

稳健性检验：2SLS 回归及工具变量排他性检验

	区域创新				区域创新			
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
工业智能化×资本流动		0.0056* (1.8070)				0.0052* (1.6989)		
资本流动		-0.0045 (-0.6706)				-0.0029 (-0.4557)		
工业智能化×高技能劳动力流动			0.0061*** (2.5826)				0.0064*** (2.6143)	
高技能劳动力流动			-0.0079*** (-3.4413)				-0.0081** * (-3.4405)	

工业智能化 ×低技能劳 动力流动				0.0302* (1.7600)				0.0272 (1.6261)
低技能劳动 力流动				-0.0464* (-1.7409)				-0.0145 (-0.6504)
工业智能化	0.0381** (5.8745)	0.0386*** (5.9738)	-0.0416 (-1.2602)	-0.4081 (-1.5892)	0.0366*** (5.5427)	0.0371*** (5.6095)	-0.0474 (-1.3790)	-0.3640 (-1.4565)
控制变量	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
城市固定效 应	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Kleibergen- Paak rk LM 统计量	258.189 [0.000]	245.798 [0.000]	15.697 [0.000]	25.345 [0.000]	288.944 [0.000]	275.423 [0.000]	16.198 [0.000]	26.262 [0.000]
Kleibergen- Paak Wald rk LM 统计 量	4980.20 8 {19.93}	3399.266 {19.93}	19.384 {19.93}	17.338 {19.93}	3662.900 {19.93}	3471.652 {19.93}	19.154 {19.93}	18.354 {19.93}
Hansen J 统 计量	0.241 [0.6236]	0.176 [0.6751]	0.505 [0.4775]	0.007 [0.9313]	0.153 [0.6957]	0.102 [0.7498]	0.377 [0.5390]	0.252 [0.6156]
N	1632	1632	1632	1632	1632	1632	1632	1632
Centered R ²	0.3457	0.3478	0.3534	0.3466	0.3474	0.3494	0.3551	0.3545

注：①[]内为相关检验统计量的 P 值；②{}内为 Stock-Yogo 检验在 10%水平上的临界值；③模型(4)(5)(7)(8)的 Kleibergen-Paak rk LM 统计量虽达不到 10%的临界值水平，但高于 15%的临界值水平 11.59，且近似接近 10%临界值水平。

附表 5 遗漏变量识别检验结果

检验模型	判断标准	计算结果	是否通过检验
(1)	方法一： $\beta^*=\beta^*(R_{\max}, \delta)$ 是否包含 0； 方法二： $ \delta(\beta=0, R_{\max}=1.3R) >1$	[0.5863,0.6321]	是
		$\delta=3.6692$	是
(2)		[0.5855,0.6315]	是
		$\delta=3.4986$	是
(3)		[0.5838,0.6236]	是
		$\delta=2.7547$	是
(4)		[0.5617,0.6081]	是
		$\delta=5.2467$	是

附表 6 按城市等级划分城市类型

变量	区域创新			
Panel A 工业智能化、资本流动对区域创新的影响	(1)	(2)	(3)	(4)
一二线×工业智能化×资本流动	0.0232** (2.4238)	-0.0171 (-1.1913)	-0.0091 (-1.6086)	-0.0158* (-1.7928)
三线×工业智能化×资本流动				
四线×工业智能化×资本流动				
五线×工业智能化×资本流动				
N	1632	1632	1632	1632
adj. R ²	0.3403	0.3607	0.3634	0.3524

Panel B 工业智能化、高技能劳动力流动 对区域创新的影响	(5)	(6)	(7)	(8)
一二线×工业智能化×高技能劳动力流动	0.0443*** (2.5957)			
三线×工业智能化×高技能劳动力流动		-0.0043** (-2.0793)		
四线×工业智能化×高技能劳动力流动			-0.0055** (-2.4655)	
五线×工业智能化×高技能劳动力流动				-0.0046** (-2.3397)
N	1632	1632	1632	1632
adj. R ²	0.4889	0.3721	0.3734	0.3607
Panel C 工业智能化、低技能劳动力流动 对区域创新的影响	(9)	(10)	(11)	(12)
一二线×工业智能化×低技能劳动力流动	0.0539*** (2.6700)			
三线×工业智能化×低技能劳动力流动		-0.0402*** (-3.1559)		
四线×工业智能化×低技能劳动力流动			-0.0368*** (-3.2951)	
五线×工业智能化×低技能劳动力流动				-0.0162* (-1.8443)
N	1632	1632	1632	1632
adj. R ²	0.4689	0.3823	0.3780	0.2238