

doi. 10. 3724/1005-0566. 20250907

# 城市层级体系三要素： 规模与密度的内生交互及对创新的影响

王如玉<sup>1</sup>, 王志高<sup>2</sup>, 梁琦<sup>3</sup>

(1. 广东工业大学经济学院, 广东 广州 510006;

2. 江西财经大学经济学院, 江西 南昌 330013;

3. 中山大学产业与区域发展研究中心, 广东 广州 510275)

**摘要:** 规模、密度与创新是城市层级跃升的关键要素。现有研究往往割裂考察各个维度, 缺乏整合性分析框架。在构建了一个融合规模与密度约束的空间创新理论模型的基础上, 运用2010—2020年中国297个地级及以上城市面板数据进行实证检验。研究发现: 第一, 城市规模与创新绩效呈显著正相关, 但这种关系受空间密度的调节; 第二, 创新绩效与人口密度呈倒U型关系, 存在特定的最优密度阈值; 第三, 最优密度阈值随城市规模增大而提高; 第四, 数字化促进虚拟集聚从而降低空间交流成本, 有效提升最优密度阈值并放大规模与密度效应的创新溢出。计算结果表明, 包括超大特大城市在内的大多数中国城市仍处于最优密度阈值以下, 具有显著加密空间。研究结果揭示了城市规模、密度与创新三要素的非线性互动机制, 提出空间经济学视域下的城市层级体系三要素理论, 对中国城市高质量发展有启示意义。

**关键词:** 城市规模; 空间密度; 创新; 虚拟集聚; 最优密度阈值; 空间经济学

中图分类号: F061.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-0566(2025)09-0079-12

## Urban hierarchy system's three elements: the endogenous interaction between scale and density and their impact on innovation

WANG Ruyu<sup>1</sup>, WANG Zhigao<sup>2</sup>, LIANG Qi<sup>3</sup>

(1. School of Economics, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. School of Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China;

3. Research Center for Industry and Regional Development, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Population size, population density, and innovation are key elements for urban hierarchy upgrading. Existing studies often examine each dimension in isolation, lacking an integrated analytical framework. This paper constructs a spatial innovation theoretical model that incorporates scale and density constraints, and conducts empirical testing using panel data of 297 prefecture-level and above cities in China from 2010 to 2020. The findings are as follows: First, urban scale has a significantly positive correlation with innovation performance, but this relationship is moderated by spatial

收稿日期: 2025-05-03 修回日期: 2025-07-30

**基金项目:** 国家社会科学基金重大项目“虚拟集聚的理论及其应用研究”(18ZDA066); 国家自然科学基金面上项目“金融虚拟集聚、融资效率与地区生产率”(71973147); 教育部人文社科研究项目“虚拟集聚对制造业高水平创新的影响: 事实、机制分析与潜力评估”(24YJA790063); 广东省自然科学基金面上项目“虚拟集聚对经济空间格局的影响机制——基于企业、产业、城市三层面的分析”(2024A1515010515)。

**作者简介:** 王如玉(1985—), 女, 江苏南京人, 博士, 广东工业大学经济学院教授, 数字经济与数据治理重点实验室研究员, 研究方向为数字经济学、空间经济学、虚拟集聚、金融经济。通信作者: 梁琦。

density. Second, there is an inverted U-shaped relationship between innovation performance and population density, with a specific optimal density threshold. Third, the optimal density threshold increases with the expansion of urban scale. Fourth, digitalization promotes virtual agglomeration, thereby reducing spatial communication costs, effectively raising the optimal density threshold, and amplifying the innovation spillover effects of scale and density. The calculation results show that most Chinese cities, including megacities and super-large cities, are still below the optimal density threshold and have significant room for density improvement. This study reveals the nonlinear interaction mechanism among the three elements of urban scale, density, and innovation, and proposes a three-element theory of the urban hierarchy system from the perspective of spatial economics, which has implications for the high-quality development of Chinese cities.

**Key words:** urban population size; population density; innovation; virtual agglomeration; optimal density threshold; spatial economy

城市作为创新活动的空间载体具有等级之分,合理的城市层级体系是资源空间优化配置的核心内生变量<sup>[1-2]</sup>。研究普遍认为集聚促进创新<sup>[3-7]</sup>,但地理集聚会受到土地资源和环境承载力的约束,城市不可能无限扩张,集聚也有拥塞效应,因此,什么样的规模和密度更加有利于城市创新,是空间经济学、城市经济学与创新地理学等关注的前沿问题<sup>[8-9]</sup>。2025 年中央城市工作会议指出,我国城镇化已步入从快速增长期向稳定发展期的转型阶段,城市发展模式正由大规模增量扩张向存量提质增效转变。在 AI 时代,人工智能正深刻重塑城市要素配置与治理结构,为城市创新注入新动力,能够借助 AI 技术激发活力,培育新兴产业,提升治理效能,从而在激烈的城市竞争中脱颖而出,实现高质量发展。在此背景下,探究城市规模与密度对创新活动的交互影响,对推动城市高质量发展具有重要理论与实践意义。

关于城市空间与创新的关系,学术研究呈现出从规模到密度再到虚实融合的演进脉络。传统理论强调规模经济的核心作用,证实创新与城市规模存在超线性关系,大城市在复杂知识创造中优势显著<sup>[10-13]</sup>。实证研究表明不同密度环境支持不同类型的创新,且二者呈复杂的非线性关系,并受产业结构多样性调节<sup>[14-16]</sup>。王如玉等<sup>[17-18]</sup>提出虚拟集聚理论。数字化催生了虚拟集聚新范式,为城市创新提供了空间新动力。王如玉等<sup>[19-20]</sup>指出,虚拟集聚和地理集聚实为“互补”,二者交融形成的“双空间”经济正深刻改变着创新的动力机制。

本文旨在进一步细化空间结构对城市创新的

动力机制。为此,我们构建了一个规模—密度—创新动态耦合机制框架。理论贡献主要体现在:首先,将城市规模与密度作为两个独立但相互作用的维度纳入统一分析框架,构建了城市空间结构影响创新绩效的微观机制模型,证实密度具有独立的倒 U 型作用路径。其次,采用空间计量经济学方法和严格的识别策略,识别并量化了不同城市的最优密度阈值,为城市空间政策提供了量化依据。最后,揭示了数字化转型对城市创新空间结构的系统性影响,对规模效应的放大和最优密度阈值的提升作用,拓展了数字经济学、空间经济学与城市经济学的交叉研究。

基于理论模型和 2010—2020 年中国 297 个地级及以上城市的综合面板数据,本文发现城市空间结构通过规模和密度两个维度共同塑造创新绩效:城市规模扩大对创新有显著促进作用,但这种效应受到空间密度水平的系统性调节;创新绩效与空间密度呈现明显的倒 U 型关系,表明存在促进高质量发展的最优密度阈值;大城市的最优密度阈值显著高于中小城市。这些发现可以解释不同空间结构城市在创新表现上的差异(限于篇幅,省略了部分计量结果)。

在理论模型和计量研究的基础上,本文概括性提出空间经济学的城市层级三要素理论,对我国城市高质量发展和建立合理的城市层级体系有启示意义。

### 一、城市空间结构影响创新的理论机制框架

城市空间结构通过规模与密度两个核心维度共同塑造创新绩效,二者之间存在复杂的内生互

动关系,而非独立线性影响。规模扩大集聚效应,密度变化影响交互质量,虚拟空间和地理空间的“双空间集聚”构成城市创新空间动力系统。

### (一)规模—密度—创新的交互作用机制

第一,规模效应机制。城市规模通过4个关键渠道促进创新生成。①知识汇聚渠道:大城市提供更丰富的知识源和更高的创意碰撞概率;②人才集聚渠道:规模扩大提升了劳动力市场匹配效率并降低了专业化人才搜寻成本;③专业化分工渠道:大城市支持更精细的创新服务分工和更完整的创新价值链;④创新需求渠道:规模经济降低了创新产品单位成本并扩大了潜在市场空间。但虚拟集聚可以影响规模效应。

第二,密度效应机制。空间密度是地理集聚的最佳显示度。密度提升通过缩短物理距离、提高交互频率、促进隐性知识传递和强化信任网络等渠道促进创新;但过度集聚会导致拥塞,拥堵外部性、生活成本和商务成本上升、环境质量下降和认知同质化等拥塞效应会对知识创新产生负面影响。一些实证研究也证明了最优密度阈值的存在<sup>[23-24]</sup>。

第三,规模—密度交互机制。规模与密度相互影响、共同塑造创新环境,构成动态耦合系统。一方面,城市通过三大效应——基础设施效应、人才结构效应、治理能力效应影响创新水平<sup>[25]</sup>;这三大效应可以视为规模的衍生效应,而不论城市层级地位高低,每个城市都是具有一定规模的集聚。另一方面,密度水平能调节规模效应:适度密度环境能充分释放规模潜力,而过高或过低密度均会削弱规模优势<sup>[26]</sup>。

### (二)数字化下虚拟集聚对创新空间机制的重塑

虚拟集聚改变了传统规模效应和密度效应的作用机制与边界条件,系统地重构城市创新的空间动力学。

第一,交流成本重构机制。数字技术改变了交流成本的空间衰减函数,降低了知识流动的地理摩擦<sup>[27]</sup>,尽管对于复杂隐性知识传递面对面互动仍然需要<sup>[28]</sup>。虚拟集聚无所不在地冲破地理空间分离的沟通障碍,已使知识交流与技术创新活动尽可能地摆脱了地理邻近性约束。

第二,创新密度阈值提升机制。虚拟集聚增强了城市空间的有效承载能力,通过3个渠道提高最优创新密度:①智能化管理提升了高密度环境的协调效率,降低了拥堵和污染等负外部性;②远程办公部分缓解了通勤压力,减少了高密度区域的物理流动需求;③数字平台增强了创新主体间的连接性,使相同密度下的知识网络更为丰富和高效<sup>[29]</sup>。

第三,城市空间放大机制。有研究表明,网上交流往往增加而非减少后续面对面交流的需求<sup>[30-31]</sup>,线上社区的形成增加了线下集聚的动力,所以数字化时代创新活动的空间集中度不降反升<sup>[32]</sup>。虚拟空间与物理空间交织互促,形成双空间融合,放大了城市空间,增强了城市创新空间生态。

第四,创新空间重组机制。数字化促使创新活动从简单的“集中或分散”二元模式转向网络模式;创新核心功能(概念形成、原模开发)保持高度空间集中,而支持性功能(数据处理、标准化测试)则向外围扩散。这种重组使创新主体能够同时获取集聚优势和分散红利,形成更为灵活的空间组织结构<sup>[33]</sup>。虚拟集聚使集聚资源更加广泛、集聚主体的地理位置更加分散,但算法技术更易强化中心的集聚力。

### (三)创新最优空间配置的理论特征与假设

基于上述机制框架,可以提炼出创新空间最优化的关键特征。第一,鉴于密度对创新的有促进和抑制的正负效应,理论上存在使创新绩效最大化的最优密度阈值。该阈值代表了知识溢出收益与拥塞效应的均衡状态。第二,根据规模对最优密度的影响机制,我们预期城市规模与最优创新密度呈正相关关系,即规模越大的城市,能够支持的最优密度阈值也越高。第三,基于虚拟集聚重塑创新空间的理论机制,我们预期数字化水平的提高将系统性地提升城市的最优创新密度阈值。第四,不同类型创新活动对空间特征的响应存在差异:突破性创新可能在密度适中但多样性高的环境中更易产生,而渐进性创新可在更高密度环境中持续发生,因为突破性创新的核心需求是“跨界碰撞”而非“资源扎堆”,而渐进式创新的核心

需求是“快速迭代”，依赖资源集聚效率；高知识复杂性生产领域对地理集聚依赖较强，而标准化程度高的生产领域和消费领域易受虚拟集聚影响。

综上，本文提出以下 4 个研究假设（见图 1）。

假设 1：城市人口规模扩张正向影响创新绩效，且表现为超线性关系——创新产出增长速度快于城市规模增长速度。

假设 2：在控制规模因素后，存在一个最优人口密度阈值使创新绩效最大化；密度低于此阈值时，创新绩效随密度提高而增加；密度超过此阈值时，创新绩效随密度提高而降低。

假设 3：数字化水平提高将增强城市创新绩效，同时提高城市创新的最优密度阈值，使创新绩效密度曲线向右上方移动。

假设 4：人口规模大的城市，其创新最优密度阈值也较高，规模与最优密度呈正相关关系。

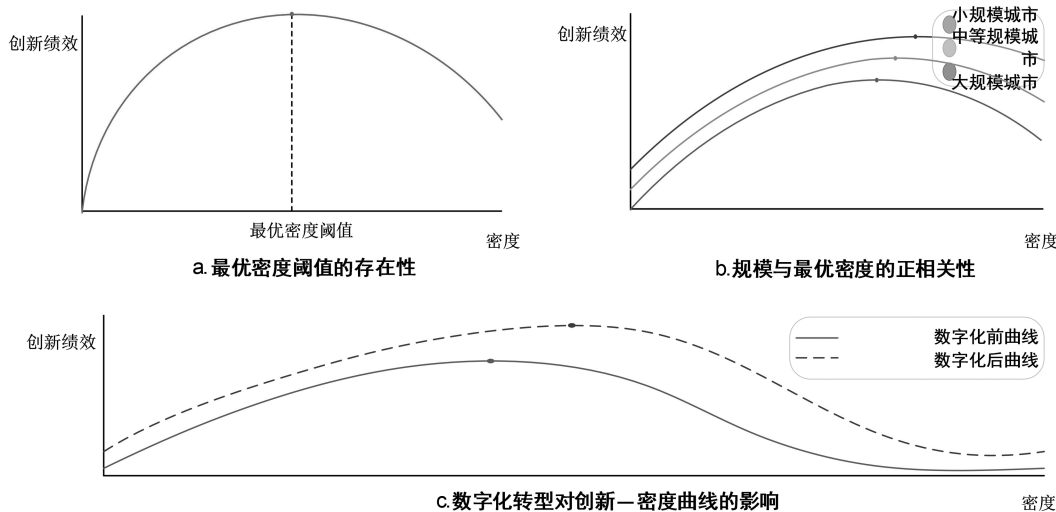


图 1 创新最优空间配置的假设

## 二、理论模型：空间约束下城市创新的内生动力机制

这一部分构建一个整合城市规模、密度与创新三要素关系的微观基础模型框架，揭示空间约束条件下城市创新活动的内生动力机制。首先建立单一城市单位空间的知识创新模型，分析经济密度和知识溢出的基本关系；然后扩展为具有异质性劳动力和空间结构的双城市模型，分析规模、密度、交流成本与创新绩效的动态交互关系。

### （一）单一城市单位空间的知识创新模型

假设城市经济由两个相互关联的部门组成：最终产品部门  $F$  和知识创新部门  $R$ ，两部门在垄断竞争市场结构下运行。

#### 1. 生产结构与市场均衡

最终产品部门由  $m$  个子部门组成，每个子部门采用柯布—一道格拉斯生产函数；最终产品市场满足垄断竞争条件，消费者需求函数具有不变替代弹性（CES）形式。知识创新部门生产的中间投入品组合  $I$  可表示为：

入品组合  $I$  可表示为：

$$I = \left[ \int_0^n x(i)^{\frac{\sigma_I - 1}{\sigma_I}} di \right]^{\frac{\sigma_I}{\sigma_I - 1}} \quad (1)$$

式(1)中， $n$  表示知识创新部门创造的差异化中间品种类数量； $x(i)$  表示第  $i$  种中间品的产量； $\sigma_I > 1$  表示中间品之间的替代弹性。知识创新部门的生产具有规模报酬递增特性，体现为固定成本与边际成本结构： $L_R(i) = f + \gamma x(i)$ ，其中  $L_R(i)$  表示生产第  $i$  种中间品所需的劳动投入， $f > 0$  表示固定成本， $\gamma > 0$  表示边际成本系数。

在垄断竞争均衡下，每种中间品的价格为边际成本的加成。计算公式为：

$$p(i) = \frac{\sigma_I}{\sigma_I - 1} \gamma w \quad (2)$$

式(2)中， $w$  为工资率。由于对称性，均衡时所有中间品的价格和产量相同，即  $p(i) = p$  和  $x(i) = x$ 。零利润条件确定了均衡产量，其计算公式为：

$$x = \frac{(\sigma_I - 1)f}{\gamma} \quad (3)$$

因此,知识创新部门的总劳动投入为:

$$L_R = \int_0^n L_R(i) di = n(f + \gamma x) = n\sigma_I f \quad (4)$$

## 2. 空间密度效应与知识溢出

假设单位空间内劳动力总量为  $L$ , 在均衡状态下有  $L = L_F + L_R$ , 同时,知识创新部门的中间品种类数  $n$  与知识创新部门的劳动投入  $L_R$  满足以下关系。

$$n = \frac{L_R}{\sigma_I f} = \frac{(1 - \beta)L}{\sigma_I f} \quad (5)$$

式(5)中,第二个等式利用了均衡条件  $L_F = \beta L$  和  $L_R = (1 - \beta)L$ 。

现在考虑单位空间内的知识溢出效应。本文假设知识溢出强度与单位空间内的有效劳动密度相关,即  $A(L) = L^\delta$ , 其中  $A(L)$  表示生产率水平,  $\delta > 0$  反映知识溢出的强度。考虑知识溢出效应后,单位空间内的总产出为:

$$Y = A(L) \cdot L_F^\beta L^{1-\beta} = L^\delta \cdot (\beta L)^\beta \cdot [n^{\frac{1}{\sigma_I-1}} x]^{1-\beta} \quad (6)$$

将式(3)和式(5)代入式(6),经整理可得:  $Y = \Omega \cdot L^{1+\delta+\frac{\beta}{\sigma_I-1}}$ , 其中  $\Omega$  是由  $\beta$ 、 $\sigma_I$ 、 $f$  和  $\gamma$  组成的常数项。令  $\eta = 1 + \delta + \frac{\beta}{\sigma_I - 1} > 1$ , 则进一步可简化为:

$$Y = \Omega \cdot L^\eta \quad (7)$$

式(7)表明,单位空间内的总产出与劳动力总量(即劳动密度)呈超线性关系,这一结果与众多实证研究一致,如 Bettencourt 等<sup>[7]</sup>。

## (二) 空间约束下的双城市创新模型

本文将上述模型扩展为具有内部空间结构的双城市模型。

### 1. 城市空间结构与交流成本

考虑两个城市  $r$  和  $s$ , 每个城市均有两个部门:最终产品部门  $F$  和知识创新部门  $R$ 。假设城市内部为线型空间结构,中心商务区(CBD)位于空间坐标原点,城市边界到 CBD 的距离为  $A$ , 即城市空间范围为  $[-A, A]$ 。

城市内部的劳动力分布密度函数表示为  $D(x)$ , 其中  $x \in [-A, A]$  表示到 CBD 的距离。城市  $j \in r, s$  的总劳动力为  $L_j = \int_{-A_j}^A D_j(x) dx$ 。考虑到与城市中心的交流成本,本文假设位于坐标  $x$  处的劳动力需要支付交流成本  $t|x|$ , 其中  $t > 0$  表示单位距离的交流成本。因此,劳动力在考虑交流成本后的有效供给为:

$$\tilde{L}_j = \int_{-A_j}^A D_j(x) (1 - t|x|) dx \quad (8)$$

式(8)中,假设  $1 - t|x| > 0$  对所有  $x \in [-A_j, A_j]$  成立,即交流成本不超过劳动的全部产出。

### 2. 异质性劳动力与知识溢出

本文引入劳动力异质性,假设城市  $j$  中高技能劳动力占比为  $\lambda_j$ 。高技能劳动力不仅直接贡献更高的生产力(假设为低技能劳动力的  $h > 1$  倍),还能通过知识溢出提升城市整体生产力。考虑异质性后,城市  $j$  的有效劳动供给为:

$$\tilde{L}_j = \int_{-A_j}^A [(1 - \lambda_j)D_j(x) + h\lambda_j D_j(x)] (1 - t|x|) dx \quad (9)$$

为简化分析,本文假设劳动力密度分布服从幂律函数:

$$D_j(x) = \frac{\alpha |x|^{\alpha-1}}{2 A_j^\alpha} \quad (10)$$

式(10)中,  $\alpha > 1$  是形状参数,此分布确保

$$\int_{-A_j}^A D_j(x) dx = 1。$$

### 3. 创新绩效与最优密度

基于上述设定,本文可以推导出城市  $j$  中知识创新部门的产出为:

$$Y_j^R = \Phi \cdot n_j^{\frac{1}{\sigma_I-1}} \cdot \tilde{L}_j^\delta \quad (11)$$

式(11)中,  $\Phi$  是常数项;  $n_j$  是城市  $j$  中开发的中间品种类数;结合式(5)和式(11)可得到计算式为:

$$Y_j^R = \Psi \cdot \tilde{L}_j^{\delta+\frac{1}{\sigma_I-1}} \quad (12)$$

式(12)中,  $\Psi$  是常数项。为分析城市密度对

创新绩效的影响,本文定义平均人口密度  $\bar{D}_j = \frac{L_j}{2A_j}$ , 并考察  $\frac{\partial Y_j^R}{\partial \bar{D}_j}$ 。

假设高技能劳动力的地理分布与城市密度相关,具体而言,高技能劳动力比例与密度的关系为:

$$\lambda_j = \lambda_0 + \theta_1 D_j - \theta_2 D_j^2 \quad (13)$$

式(13)中,  $\lambda_0 > 0, \theta_1 > 0, \theta_2 > 0$ 。这一设定捕捉了以下特征:低密度时,密度提升有助于吸引高技能劳动力;但密度过高时,拥挤成本和生活成本上升会降低高技能劳动力比例。

同时,虚拟集聚可以大大降低交流成本,而虚拟集聚与城市数字化水平相关,我们不妨直接假设交流成本与数字化水平存在的关系为:

$$t_j = t_0 - \mu \cdot Digital_j \quad (14)$$

式(14)中,  $t_0 > 0$  是基础交流成本,  $Digital_j \in [0, 1]$  表示城市  $j$  的数字化水平,  $\mu > 0$  表示数字化对交流成本的降低效应。

将式(9)、式(10)、式(13)和式(14)代入式(12),通过一系列数学推导,可以得到创新绩效  $Y_j^R$  关于平均人口密度  $\bar{D}_j$  的一阶导数和二阶导数。在一定条件下,存在最优人口密度  $\bar{D}_j^*$  使得创新绩效最大化。

$$\bar{D}_j^* = \frac{\theta_1 h}{2\theta_2 h} + \frac{(t_0 - \mu \cdot Digital_j)^{-1}}{2\alpha} \quad (15)$$

式(15)揭示了几个重要关系:最优密度与高技能劳动力生产力 ( $h$ ) 正相关,表明高技能劳动力比例越高,城市能够承载更高的最优密度;最优密度与数字化水平 ( $Digital_j$ ) 正相关,数字化程度越高,交流成本越低,城市的最优密度阈值越高;最优密度还与城市空间结构参数 ( $\alpha$ ) 相关,反映了城市内部空间结构对创新绩效的影响。

#### 4. 城市规模、密度与创新的关系

为分析城市规模与最优密度的关系,本文考虑劳动力总量  $L_j$  对最优密度  $\bar{D}_j^*$  的影响。在本文的模型中,城市规模通过以下几个效应改变最优密度:①规模—技能效应:大城市对高技能劳动力有更大的吸引力,即  $\frac{\partial \lambda_0}{\partial L_j} > 0$ ;②规模—创新效应:大城市

创新基础设施更完善,知识创新的固定成本分摊较低,即  $\frac{\partial f}{\partial L_j} < 0$ ;③规模—管理效应:大城市先进的管理技术和城市治理能力能更有效地处理高密度带来的拥挤问题,即  $\frac{\partial \theta_2}{\partial L_j} < 0$ 。

通过三大效应,本文可以得到城市规模与最优密度的关系:

$$\frac{\partial \bar{D}_j^*}{\partial L_j} = \frac{h}{2\theta_2} \frac{\partial \theta_1}{\partial L_j} - \frac{\theta_1 h}{2\theta_2^2} \frac{\partial \theta_2}{\partial L_j} > 0 \quad (16)$$

即,城市规模与最优密度正相关:规模越大的城市,其最优密度阈值也越高。

### 三、实证研究设计

#### (一)数据来源与样本构建

本文使用 2010—2020 年中国 297 个地级及以上城市的平衡面板数据,覆盖了中国大陆所有省级行政区(不含港澳台地区)的主要城市。数据主要来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》和国家知识产权局专利查询系统等官方渠道。为确保数据的空间一致性,所有城市层面的变量均采用市辖区(即建成区)口径,这一处理方式避免了行政边界调整可能导致的数据偏差,也更准确地反映了城市实际的经济活动密度。

样本选择遵循以下原则:首先,剔除了数据严重缺失的城市;其次,排除了在研究期间经历重大行政区划调整的城市,以避免政策外生性冲击;最后,剔除了少数极端异常值。最终获得的样本包含 297 个城市共计 3 267 个观测值。为进行异质性分析,本文按照城区常住人口规模将城市分为大城市组(100 万人以上,99 个城市)和中小城市组(100 万人以下,198 个城市),单独考察不同规模城市的空间创新动力机制。

#### (二)实证模型与变量测量

##### 1. 基准计量模型

基于理论模型的推导,本文设计如下计量模型检验城市规模、密度对创新绩效的影响。

$$Innovation_{it} = \alpha + \beta_1 Size_{it} + \beta_2 Density_{it} + \beta_3 Density_{it}^2 + \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (17)$$

式(17)中,  $i$  代表城市;  $t$  代表年份;  $Innovation_{it}$  表示城市创新绩效;  $Size_{it}$  表示城市规模,  $Density_{it}$  表示城市人口密度;  $Density_{it}^2$  是密度的平方项, 用于捕捉密度与创新之间的非线性关系;  $X_{it}$  为一系列控制变量;  $\mu_i$  为城市固定效应;  $\lambda_t$  为时间固定效应;  $\varepsilon_{it}$  为随机扰动项。

本文进一步构建交互效应模型为:

$$Innovation_{it} = \alpha + \beta_1 Size_{it} + \beta_2 Density_{it} + \beta_3 Density_{it}^2 + \beta_4 Digital_{it} + \beta_5 Size_{it} \times Digital_{it} + \beta_6 Density_{it} \times Digital_{it} + \beta_7 Density_{it}^2 \times Digital_{it} + \gamma X_{it} + \mu_i + \lambda_t + \varepsilon_{it} \quad (18)$$

式(18)中,  $Digital_{it}$  表示城市数字化水平, 交互项用于捕捉数字化水平对规模效应和密度效应的调节作用。

## 2. 变量测量与数据处理

被解释变量为: 城市创新绩效 ( $Innovation_{it}$ ) 采用各年度城市市辖区专利授权数量测量。专利数据直接从国家知识产权局专利查询系统获取, 按专利权人所在地统计, 确保空间归属准确性。为进行稳健性检验, 本文还使用发明专利授权数、实用新型专利授权数和外观设计专利授权数作为替代指标, 以考察不同创新类型的空间动力特征。此外, 考虑到专利数量可能受到城市规模影响, 本文还计算了人均专利指标和城市专利占全国比重指标, 以控制规模效应。

核心解释变量有以下 3 个。

城市规模 ( $Size_{it}$ ): 采用主成分分析法提取城市规模综合因子, 考虑市辖区常住人口、市辖区生产总值和小学在校学生数等指标。主成分分析前对指标进行标准化处理, 样本  $KMO$  检验值为 0.750 1, 适合进行主成分分析。在稳健性检验中, 本文也直接使用市辖区常住人口数作为规模指标的替代变量。

城市人口密度 ( $Density_{it}$ ): 计算为市辖区常住人口数除以市辖区面积, 单位为人/平方公里。本文还计算了就业密度(就业人数除以市辖区面积)作为替代指标, 用于稳健性检验。

数字化水平 ( $Digital_{it}$ ): 采用主成分分析法从多个数字化指标中提取综合因子。样本  $KMO$  检验值为 0.610 6, 适合进行主成分分析。为进行异

质性分析, 本文还按照数字化水平的 75% 分位数将城市划分为高数字化组和低数字化组。

控制变量 ( $X_{it}$ ) 有以下 5 个城市特征变量, 以降低遗漏变量偏误。

创新投入: 地方政府科学技术支出, 反映政府对创新的财政支持力度;

人力资本: 执业助理医师数量, 作为城市人力资本水平的代理变量;

基础设施: 公共汽车数量、出租汽车营运车数等, 反映城市交通基础设施发展水平;

文化资源: 公共图书馆图书藏量, 反映城市文化资本积累状况;

产业结构: 第三产业比重, 反映城市产业转型升级程度。

所有金额类变量均采用 2010 年不变价格进行平减, 确保跨年度可比性。为降低异方差问题和处理变量的偏态分布, 本文对部分变量进行了对数转换。

表 1 报告了主要变量的描述性统计结果。

表 1 主要变量描述性统计

变量	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
专利授权数(件)	3 267	5 421.30	14 218.50	13	24 1037
发明专利授权数(件)	3 267	1 198.70	4 351.60	1	85 169
城市规模因子	3 267	0	1	-1.328	6 742
人口密度(人/平方公里)	3 267	1 582.50	1 353.60	42.8	9 538.70
数字化水平因子	2 772	0	1	-1.495	5.623
科技支出(亿元)	3 090	9.27	22.15	0.03	324.56
公共图书馆藏书(万册)	3 090	125.6	162.4	2.5	1 853.20

从表 1 可以看出, 中国城市在创新绩效、规模和密度方面存在巨大差异。专利授权数的均值为 542 1.3 件, 但标准差高达 14 218.5 件, 表明城市间创新能力差异显著。人口密度平均为 1 582.5 人/km<sup>2</sup>, 最高值(9 538.7 人/km<sup>2</sup>) 是最低值(42.8 人/km<sup>2</sup>) 的 223 倍, 反映了中国城市空间结构的多样性。这些显著的城市差异为本文研究规模、密度与创新三要素的关系提供了良好的观察窗口。

### (三) 识别策略与内生性问题处理

城市规模、密度与创新三要素之间可能存在复杂的内生关系, 主要体现在 3 个方面: 一是反向因果关系——创新活跃的城市可能吸引更多

人口流入,导致规模和密度增加;二是同步偏误——某些未观测因素(如城市发展政策)可能同时影响规模、密度和创新表现;三是测量误差——特别是在人口统计和专利统计方面可能存在系统性偏差。为缓解这些内生性问题,本文采取以下识别策略。

第一,采用面板固定效应模型,控制城市层面不随时间变化的固定特征(如地理位置、历史文化)和所有城市共同面临的时间冲击(如宏观经济政策变化),一定程度上缓解了遗漏变量偏误。

第二,使用工具变量法处理可能的反向因果关系。具体而言,本文选择 2009 年(样本期前)的城市死亡人口数量作为城市规模的工具变量。这一选择基于以下考虑:一方面,2009 年的死亡人口数量与当期城市规模高度相关(相关系数 0.835 3),满足工具变量的相关性要求;另一方面,历史死亡人口不太可能通过当期创新绩效以外的其他渠道直接影响当期城市创新活动,满足排他性要求。本文进行了一系列诊断性检验,包括弱工具变量检验和过度识别检验,确保工具变量的有效性。

第三,本文还采用了时滞处理法,即使用前一期( $t-1$ )的解释变量预测当期( $t$ )的创新绩效,这一方法有助于缓解同期反向因果问题。

第四,为确保结果的稳健性,本文进行了一系列敏感性分析,包括使用替代变量、改变样本范围、调整计量方法等,检验结果在不同设定下的一致性。

#### 四、计量结果与讨论

##### (一)基准回归结果

表 2 报告了城市规模、密度对创新绩效影响的基准回归结果。列(1)~列(3)是全样本回归,列(4)和列(5)分别是中小城市组和大城市组的分样本回归。

表 2 的回归结果支持了本文的理论假设。

第一,城市规模对创新绩效具有显著的正向影响。在控制其他变量后,城市规模系数在五个模型中始终显著为正,这验证了假设 1:城市人口规模扩张能增大城市创新绩效优势。这一结果符

合理理论模型的预测:规模扩大不仅带来简单的人口聚集,还促进了创意碰撞和知识溢出,提高了创新效率。

表 2 城市规模、密度与创新三要素绩效——基准回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	全样本	全样本	全样本	中小城市	大城市
城市规模	1.582 6*** -3.84	0.517 7** -2.09	0.372 8** -2.35	0.091 4** -2.53	0.422 9** -2.21
人口密度	2.427 2*** -2.54	1.660 9** -2.58	1.478 8*** -2.9	0.175 2* -1.96	2.812 3*** -2.97
人口密度平方	-1.207 0* (-0.90)	-1.208 6 (-1.40)	-1.416 9** (-2.05)	-0.223 6* (-1.77)	-2.887 8*** (-2.77)
公共图书馆图书藏量		2.253 3* -1.7	1.019 1 -0.7	0.737 7* -1.93	1.165 7 -0.79
科学技术支出		0.020 5*** -4.44	0.017 9*** -7.84	0.004 3*** -2.63	0.017 1*** -6.63
执业助理医师数		0.153 5 -0.67	0.220 0** -2	0.016 1 -0.84	0.199 -1.4
出租汽车数量		-1.157 6* (-1.74)	-0.636 6* (-1.68)	-0.053 9 (-0.93)	-0.891 4* (-1.73)
数字化水平		—	0.148 0*** -2.63	0.013 1 -1.01	0.158 1** -2.47
常数项	控制	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	是	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是	是
观测数	3 155	3 090	2 772	1 852	920
R <sup>2</sup>	0.457	0.513	0.542	0.376	0.618
城市数	297	297	297	198	99

注:\*\*\*、\*\*、\* 分别表示在  $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$  时有统计学意义。所有回归均使用城市层面聚类稳健标准误;列(4)和列(5)分别是城区常住人口规模在 100 万人以下和 100 万人以上的城市样本。

第二,城市人口密度与创新绩效之间存在显著的倒 U 型关系。在全部 5 个模型中,人口密度的一次项系数显著为正,而平方项系数为负,其中在模型(3)、模型(4)和模型(5)中平方项系数统计显著。这一结果验证了假设 2:在空间约束下,存在最优人口密度使创新绩效最大化;当密度低于此阈值时,创新绩效随密度提高而增加;当密度超过此阈值时,创新绩效随密度提高而降低。

第三,比较模型(4)和模型(5)可以发现,大城市组的密度系数明显高于中小城市组,表明规模较大的城市从密度提升中获得的创新收益更大。通过计算最优密度阈值,本文发现大城市组的最优密度阈值为 4 869 人/km<sup>2</sup>,而中小城市组为 3 918 人/km<sup>2</sup>。这一结果支持了假设 4:人口规模大的城市,其最优密度阈值也较高。

第四,数字化水平的系数在模型(3)和模型(5)中显著为正,表明数字化发展对城市创新具有促进作用,且这一效应在大城市更为显著。这为

假设3提供了初步支持,但要全面验证数字化对密度效应的调节作用,还需进一步的交互效应分析。

在控制变量方面,科学技术支出对创新绩效有显著正向影响,表明政府创新投入的重要性。执业助理医师数在全样本中显著为正,反映了人力资本对创新的推动作用。公共图书馆图书藏量在部分模型中显著为正,说明文化资源对创新活动的支持作用。出租汽车数量系数为负,可能反映了拥堵和交通压力对创新的负面影响。

### (二)数字化水平对规模效应与密度效应的异质性作用

为进一步检验数字化水平对规模效应和密度效应的调节作用,本文按数字化水平将样本划分为高数字化组和低数字化组,分别进行回归分析。表3呈现了分组回归结果。

表3 数字化水平调节效应分析——分组回归结果

变量	(1)	(2)	(3)	(4)
	低数字化组	高数字化组	低数字化组	高数字化组
被解释变量	专利授权	专利授权	实用新型	实用新型
城市规模	0.102 5*** -3.24	0.412 7* -1.7	0.045 2*** -2.99	0.417 7*** -2.75
人口密度	0.182 2** -2.07	3.480 3** -2.33	0.055 5 -1.16	2.443 6** -2.54
人口密度平方	-0.294 5** (-2.29)	-3.596 8** (-2.19)	-0.057 8 (-0.85)	-2.388 8** (-2.41)
公共图书馆 图书藏量	0.487 2** -2.04	1.314 8 -0.78	0.370 9*** -2.92	0.435 4 -0.5
科学技术支出	0.005 0*** -2.7	0.017 3*** -6.19	0.003 8*** -2.79	0.008 1*** -5.28
执业助理 医师数	0.030 8 -1.35	0.275 7 -1.24	0.018 5 -1.59	0.090 1 -0.95
出租汽车数量	0.020 7 -0.8	-0.960 5* (-1.71)	-0.004 9 (-0.37)	-0.736 0** (-2.22)
常数项	控制	控制	控制	控制
城市固定效应	是	是	是	是
时间固定效应	是	是	是	是
观测数	2 090	704	2 090	704
R <sup>2</sup>	0.392	0.561	0.347	0.534
城市数	247	71	247	71

注:\*\*\*、\*\*、\*分别表示在 $p < 0.01$ 、 $p < 0.05$ 、 $p < 0.1$ 时有统计学意义。所有回归均使用城市层面聚类稳健标准误;高数字化组和低数字化组分别是数字化水平高于和低于75%分位数的城市样本。

表3的结果揭示了数字化水平对规模效应和密度效应的重要调节作用。

首先,高数字化城市的规模系数明显大于低数字化城市,无论是对总专利授权还是实用新型专利。这表明数字化水平提高放大了城市规模效应,高数字化城市能够更有效地利用规模优势促

进创新。

其次,高数字化城市的密度系数显著高于低数字化城市,表明数字化水平提高大幅增强了密度对创新的促进作用。同时,密度平方项的负向系数在高数字化组也更大,说明高数字化环境下密度与创新的倒U型关系更为陡峭,最优密度点更为明显。

最后,通过计算最优密度阈值,本文发现低数字化城市组的最优密度为3 093人/km<sup>2</sup>,而高数字化城市组为4 838人/km<sup>2</sup>。这一结果支持了假设3:交流成本的降低(包括数字化水平提高带来的交流成本降低)将提高城市的最优密度阈值。

此外,本文注意到控制变量的影响也存在异质性。例如,科学技术支出在高数字化城市的边际效应更大,表明高数字化环境能更有效地将创新投入转化为创新产出;出租汽车数量的负向影响在高数字化城市更为显著,可能反映了高数字化城市面临更严重的交通拥堵问题。

总体而言,分组回归结果表明,数字化转型通过降低空间交流成本,显著放大了城市规模效应和密度效应,并提高了最优密度阈值。这一发现对政策制定具有重要启示:城市在推进数字化转型的同时,可以支持更高的人口密度水平,从而最大化创新潜力。

### (三)内生性问题处理

为解决可能的内生性问题,本文采用工具变量法进行估计。工具变量估计前本文进行了详细的诊断性检验,报告了工具变量估计结果。工具变量估计结果显示,在控制内生性后,城市规模对创新绩效仍有显著的正向影响,进一步验证了假设1的稳健性。人口密度与创新绩效之间的倒U型关系在大多数模型中成立。最优密度阈值的计算结果与基准回归相似,进一步支持了假设2。

### (四)稳健性探讨

首先,本文将专利授权数前置一期、对专利授权数进行标准化处理,以及以发明公布数进行计量检验,交叉验证规模、密度对城市创新的影响,检验的结果是核心结论基本不变。同时以市区常住人口规模作为城市规模的替代变量,但考虑城市人口规模和城市人口密度之间存在相关性,本文进行如下处理:先将各城市人口总量对城市的人口密度及其平方项进行回归,求得残差值;再将

该残差值作为各城市人口总量的替代变量,与城市人口密度等变量放入计量模型中进行回归,从而尽量减少多重共线性的影响。

其次,本文对重要的解释变量进行替代性检验。例如使用城市所拥有的公共汽车数量、出租车、道路面积、高峰拥堵指数分别衡量城市交通运输能力。

最后,在计量方法上,本文先后采用固定效应模型、固定效应模型的工具变量法、将被解释变量前置 1 期等方法进行估计,不同估计方法所得到的结论一致。

## 五、总结

### (一) 主要结论

本文通过构建理论模型和实证分析,系统揭示了城市规模、密度与创新绩效之间的复杂关系及数字化转型的调节作用。研究的 4 个核心假设均得到稳健的经验支持。第一,城市规模对创新绩效具有显著的超线性促进作用。实证结果表明,城市规模系数在 0.091~1.583 区间内显著为正,工具变量估计进一步确认了这一因果关系,验证了城市规模扩张通过知识溢出、劳动力池和中间投入共享等集聚机制促进创新的理论预期。第二,密度与创新绩效呈现倒 U 型关系,存在最优密度阈值。全样本最优密度约为 4 520 人/km<sup>2</sup>,超过此阈值后,拥堵效应将抵消集聚收益。这表明城市空间结构优化需要在地理集聚与拥堵成本之间寻求平衡。第三,数字化转型显著重塑了城市创新空间格局。高数字化城市组的最优密度阈值(4 838 人/km<sup>2</sup>)比低数字化城市组(3 093 人/km<sup>2</sup>)高出 56.4%,且规模效应和密度效应均得到显著增强。这表明数字技术创造虚拟集聚,通过降低交流成本和提高匹配效率,扩展了城市创新的空间承载力。第四,城市规模与最优密度呈正相关关系。大城市组的最优密度阈值(4 869 人/km<sup>2</sup>)显著高于中小城市组(3 918 人/km<sup>2</sup>),反映了大城市更强的密度承载能力和更复杂的空间组织城市效率。

本文研究发现对现实有较强的解释力。深圳是中国首个以城市为基本单元的国家自主创新示范区。而在“第六次人口普查”到“第七次人口普查”10 年间,全国人口增长最多的城市是深圳,增长了 700 万人口,占到了其 2010 年的 70% 以上,作为名副其实的“创新之都”,深圳是全国面积最小、人口

密度最高的大城市。可见密度对城市的重要性。2024 年,浙江吸引外省人口数量达 45.4 万,仅次于广东,而杭州是浙江虹吸人口第一城。早在 2007 年我国各大城市曾掀起过抢人大战,进入 2025 年,在“杭州六小龙”现象刺激下,各地新一轮“抢人”大战再度升级,而且从娃娃抓起,如杭州、长沙等城市“大门敞开”,无房无户孩子可以来上学。

### (二) 城市层级三要素理论

从空间经济学的视角看:①创新活动主要集中在城市,城市因人才集聚、产业配套、基础设施完善及需求多样性等优势,是创新的核心空间载体;②在全球化竞争和资源约束背景下,创新(技术、制度、模式创新)是城市突破“资源瓶颈、路径依赖”的关键,是高质量可持续发展的核心路径;③一般来说,城市存在“层级—创新”正相关效应,那些层级高的城市,通常拥有更优质的创新要素(高校、科研院所、龙头企业、金融资本),创新力普遍更强;④创新力未必是城市提高层级地位的充分条件,但一定是必要条件,城市若想实现层级跃升,必须提高创新力;⑤创新依赖“高知识、高技能人才”,人口规模越大,潜在人才池就越大,所以规模是城市培育创新力的基础,地理集聚是扩大规模的途径;⑥地理集聚可能产生拥塞效应,所以密度会对规模效应有调节作用,适当的密度会强化规模效应,过大的密度会抵销规模作用;⑦正是由于规模与密度的内生交互作用,以及创新对城市向上攀登层级的影响作用,规模、密度与创新是市场经济条件下城市层级体系的关键要素和核心驱动力。

城市层级体系的演进以关键要素的协同作用为核心,规模、密度与创新在此过程中形成相互支撑的动态关联,共同决定城市功能能级的提升路径。城市规模的价值并非人口数量的简单叠加,而是高技能人才、产业资源等创新要素的集聚程度及其协同效率,只有当要素质量与产业基础相匹配,这种规模才能为城市突破层级瓶颈奠定基础。密度作为调节规模效应的核心变量,其适配性直接影响城市层级效能。创新则是驱动城市层级跃升的核心动力,更是规模要素优势与密度协同优势转化为核心竞争力的关键纽带,缺乏创新能力的城市易陷入“规模膨胀而层级停滞”的困境。三者的动态平衡构成城市能级提升的内在逻辑。

辑:规模为创新提供要素基础,密度为创新搭建高效场景,创新为规模与密度赋予价值增量。从空间经济学视角来看,规模、密度与创新是城市层级跃升的关键三要素。这一逻辑体系即空间经济学的“城市层级三要素理论”。

在经济层面上,城市是生产要素和消费的集聚中心,而中心的形成是市场力量经济主体用脚投票的结果。“适度密度+大规模+强创新→高层级城市”符合空间经济学逻辑。但在政治层面上,城市是国家的“层级隶属”,因此“行政层级”和“功能定位”不仅是决定城市层级的核心要素,而且是“规模、密度和创新”发挥作用的基础:行政层级决定了城市的资源获取能力,功能定位决定了城市规模、密度的合理区间。因此,在政治经济学的空间视域中,规模、密度、创新、行政层级和功能定位五要素共同构成城市层级体系的关键要素,其中规模与密度存在内生交互作用,创新是层级跃升的核心动力,行政层级与功能定位则决定了要素发挥作用的基础框架。

### (三) 三点启示

第一,各大城市要努力提高最优密度阈值。据本文计量结果,我国绝大多数城市都有提高密度的必要,尤其是大城市。城市越大,越有提高最优密度阈值的潜力。在达到最优密度阈值之前,吸引人口有利于城市创新;即便达到了当前条件下的最优密度阈值,也应通过加强数字化而提升空间承载力,提高最优密度阈值。我国超大城市、特大城市、大城市是创新的主力军,先锋队,理应担负建设“创新型国家”的重任。

第二,城市创新要改变“引人”思路。以往中国城市间的创新竞争聚焦“抢人才”,各地纷纷出台补贴、落户优惠,试图以高端人才撬动发展。这在人口红利期确有成效,但随着人口总量下降,单靠争夺少数人才的模式渐显局限——人才需要产业土壤,更需要人口支撑的消费市场、服务体系和社会活力。因此,城市创新不能再只盯着“塔尖”,而要“向下看”——吸引普通人口。人口是创新的基础盘:足够的人口规模、较大的人口密度,能孕育多元消费需求,催生新业态;完善的劳动力结构可支撑产业链上下游协同,降低创新成本;而在虚拟集聚无所不在的时代,虚拟空间的个体需

求都可能成为创新的源头。当然,吸引人口并非简单“扩规模”,而是要完善公共服务、优化生活成本,让普通劳动者能安居。当城市既能留住人才,也能容纳更多普通人,形成“人才引领、人口支撑”的良性循环,创新才能真正扎根,实现可持续发展。

第三,随着数字化和AI的迅速发展,经济已进入虚拟集聚和地理集聚并存的“双空间集聚”新阶段,且虚拟集聚的影响力日益增强,对经济范式和资源空间配置产生了巨大的影响。高等级城市凭借强大的AI算力中心、丰富的科研资源、完善的产业链和活跃的创新氛围等优势,依然能吸引大量人口和企业集聚。这将重塑资源空间格局,更显城市层级跃升的重要性。利用虚拟集聚引智引才促进创新,已成为城市高质量发展的重要标志之一。虚拟集聚与城市高质量发展是内在契合的:虚拟集聚可突破引才地理壁垒,匹配高质量发展的“智力需求”;虚拟集聚可直接服务创新,契合高质量发展从要素驱动转向创新驱动的“核心逻辑”;虚拟集聚发展体现城市治理与公共服务的“高质量水平”。因此,每一个城市都要充分利用虚拟集聚赋能城市创新,具体路径可从搭建虚拟平台、优化资源配置、推动产创融合、完善支撑体系等四维度着眼。

### (四) 研究局限与未来展望

尽管本文的计量采用了多种稳健性检验,但仍存在改进空间。首先,使用城市行政区划层面的平均密度未能充分捕捉城市内部密度分布差异,未来研究可利用更细粒度的空间数据探索城市内部多中心结构对创新的影响。其次,本文研究主要关注专利授权量而对创新质量考察有限,未来可考虑创新影响力或突破性前沿性创新比例等质量维度。再次,虚拟集聚正在展现出无穷的发展潜力和更大的应用空间,但虚拟集聚的测度方法还是黑箱,本文只是借助数字化从理念上说明它对创新的影响,并没有精细的刻画。在AI时代,虚拟集聚伴随着人类生产和生活,对虚拟集聚的精细研究将是一个重要的方向。

#### 参考文献:

- [1]梁琦,陈强远,王如玉.户籍改革、劳动力流动与城市层级体系优化[J].中国社会科学,2013(12):36-59,205.
- [2]梁琦,论资源空间配置观[J].中国经济问题,2007(3):5-11.

- [3] 梁琦, 产业集聚论[M]. 北京: 商务印书馆, 2004.
- [4] 梁琦, 分工、集聚与增长[M]. 北京: 商务印书馆, 2009.
- [5] CARLINO G, KERR W R. Agglomeration and innovation [J]. Handbook of regional and urban economics, 2015, 5: 349-404.
- [6] DURANTON G, PUGA D. The economics of urban density[J]. Journal of economic perspectives, 2020, 34(3): 3-26.
- [7] BETTENCOURT L M, LOBO J, HELBING D, et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [8] AHLFELDT G M, PIETROSTEFANI E. The economic effects of density: a synthesis[J]. Journal of urban economics, 2019, 111: 93-107.
- [9] COMBES P P, DURANTON G, GOBILLON L, et al. The productivity advantages of large cities: distinguishing agglomeration from firm selection[J]. Econometrica, 2012, 80(6): 2543-2594.
- [10] CUI W, TANG J. Innovation convergence clubs and their driving factors within urban agglomeration [J]. Economic modelling, 2023, 121: 106199.
- [11] XU Z, XU G, LAN T, et al. Global consistency of urban scaling evidenced by remote sensing[J]. PNAS nexus, 2025, 4(2): pgaf037.
- [12] WANG S, LIU H, LI Y, et al. Exploring the innovation potential of urban space at the micro scale: a case study of Suzhou's main urban area[J]. Humanities and social sciences communications, 2025, 12(1): 1-17.
- [13] JUHÁSZ S, PINTÉR G, KOVÁCS Á J, et al. Amenity complexity and urban locations of socio-economic mixing[J]. EPJ data science, 2023, 12(1): 34.
- [14] YANG Y, ZHANG J, HUANG J, et al. Urban density and spatial carbon emission performance of megacities in China [J]. Scientific reports, 2024, 14(1): 23862.
- [15] HE X, YU Y, JIANG S. City centrality, population density and energy efficiency[J]. Energy economics, 2023, 117: 106436.
- [16] DUAN W, MADASI J D, KHURSHID A, et al. Industrial structure conditions economic resilience [J]. Technological forecasting and social change, 2022, 183: 121944.
- [17] 王如玉, 梁琦, 李广乾. 虚拟集聚: 新一代信息技术与实体经济深度融合的空间组织新形态[J]. 管理世界, 2018, 34(2): 13-21.
- [18] 王如玉, 空间的演进: 城市、金融与虚拟集聚[M]. 北京: 商务印书馆, 2025: 185-210.
- [19] 王如玉, 梁琦. 面向空间的经济学与虚拟空间经济新范式[J]. 学海, 2024(4): 65-75.
- [20] 王如玉, 梁琦. 从“数字中国”迈向“智能中国”: 由数字生产要素形成谈起[J]. 河南社会科学, 2005(9): 13-23.
- [21] MCDONALD R I, ARONSON M F J, BEATLEY T, et al. Denser and greener cities: Green interventions to achieve both urban density and nature[J]. People and nature, 2023, 5(1): 84-102.
- [22] BRISTOW G, HEALY A. Innovation and regional economic resilience: an exploratory analysis[J]. The annals of regional science, 2018, 60(2): 265-284.
- [23] PANDEY B, BRELSFORD C, SETO K C. Infrastructure inequality is a characteristic of urbanization[J]. Proceedings of the national academy of sciences, 2022, 119(15): e2119890119.
- [24] CARLINO G A, CHATTERJEE S, HUNT R M. Urban density and the rate of invention[J]. Journal of urban economics, 2007, 61(3): 389-419.
- [25] BERKES E, GAETANI R. The geography of unconventional innovation [J]. The economic journal, 2021, 131(636): 1466-1514.
- [26] ROCA J D L, PUGA D. Learning by working in big cities[J]. The review of economic studies, 2017, 84(1): 106-142.
- [27] AHLFELDT G M, PIETROSTEFANI E. The economic effects of density: a synthesis[J]. Journal of urban economics, 2019, 111: 93-107.
- [28] FORMAN C, VAN ZEEBROECK N. Digital technology adoption and knowledge flows within firms: can the Internet overcome geographic and technological distance? [J]. Research policy, 2019, 48(8): 103697.
- [29] 王如玉, 梁琦. 数字经济下虚拟集聚的现实基础与应用[J]. 长安大学学报(社科版), 2022(4): 34-52.
- [30] DELVENTHAL M J, KWON E, PARKHOMENKO A. JUE insight: how do cities change when we work from home? [J]. Journal of urban economics, 2022, 127: 103331.
- [31] GASPAR J, GLAESER E L. Information technology and the future of cities[J]. Journal of urban economics, 1998, 43(1): 136-156.
- [32] BATTISTON D, BLANES I V J, KIRCHMAIER T. Face-to-face communication in organizations[J]. The review of economic studies, 2021, 88(2): 574-609.
- [33] FORMAN C, GOLDFARB A, GREENSTEIN S. Agglomeration of invention in the Bay Area; not just ICT[J]. American economic review, 2016, 106(5): 146-151.
- [34] BUZARD K, CARLINO G A, HUNT R M, et al. The agglomeration of American R&D labs [J]. Journal of urban economics, 2017, 101: 14-26.

( 本文责编: 润 泽 )