

城市人口集聚与城市间人口流动对经济产出的影响

雷玮倩¹, 焦利民^{1,2}

(1. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079;
2. 武汉大学地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 城市标度律认为城市的诸多特征均是社会互动与联系的产物, 其假设城市经济产出等要素很大程度上由城市人口规模(城市内部相互作用)决定, 隐含了集聚经济的假设。城市人口集聚代表了局部的网络效应, 而社会生产效率还应度量城市在更大空间尺度上全局网络效应的影响。以中国275个地级及以上级别城市为研究对象, 利用百度迁徙数据构建城市人口流动网络, 以城市人口流动强度刻画外部交互程度, 借助城市标度律框架比较分析城市内部人口规模和外部交互与城市经济产出之间的非线性关系。结果发现: 城市经济产出与城市外部交互之间也存在显著的超线性标度关系, 且城市外部交互对于城市经济产出具有更高的乘数效应, 网络空间相互作用不容忽视且已成为集聚经济的重要补充。进一步引入城市人口密度、集聚外部性和网络外部性等指标, 定量综合测度城市人口集聚与城市间人口流动及其协同作用对城市经济产出的影响, 发现城市人口规模带来的集聚效应仍是区域经济发展的主要动力, 城市在城际协同关系中借助网络化而获益的能力还有待增强。本文有助于深化对标度律机制的理解, 并从经济增长的集聚效应和网络效应两方面为区域一体化发展提供决策支持。

关键词: 集聚效应; 网络效应; 城市标度律; 人口流动; 经济产出

DOI: 10.11821/dlxb202308008

1 引言

近年来伴随着城市间要素流动的加强与优势资源的共享, 城市空间联系愈发多样密切, 城市空间组织形式与发展模式由向心式向网络化空间一体化发展转变^[1-3]。通过网络空间联系, 城市在更大尺度上通过借用规模、经验交换、知识流动、分工协作来提高城市绩效^[4-6]。城市不仅可以通过物质网络如公路、铁路等基础设施网络实现跨区域联系, 也可通过人口流动、贸易往来、生产合作、网络搜索等非物质空间交互网络实现要素的流动与交换。作为一种俱乐部产品, 城市网络效应的重要性逐渐凸显, 并已成为城市经济增长、空间协同发展与区域一体化发展的重要推动力^[7-9]。

城市网络对经济增长的效应主要体现在两方面, 一种是反映城市功能的网络层级性特征, 主要由节点度、强度等指标表征, 反映了城市在网络中的重要性和竞争力。另一种则是与集聚经济相对应的城市网络外部性, 其本质是城市嵌入网络所带来的外部性收益。与集聚经济不同的是, 网络外部性不受空间和地理距离的约束, 取决于城市之间的功能关系强度, 而非邻近性。其效用很大程度体现在对生活成本的节约上, 处于网

收稿日期: 2022-03-07; 修订日期: 2023-04-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41971368) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41971368]

作者简介: 雷玮倩(1996-), 女, 四川成都人, 博士生, 研究方向为城市标度律与复杂城市系统。

E-mail: leiweiqian@whu.edu.cn

通讯作者: 焦利民(1977-), 男, 河南安阳人, 教授, 博士生导师, 研究方向为城市化与国土空间优化, 地理空间分析与建模等。E-mail: lmjiao@whu.edu.cn

络中的城市通过与合作伙伴建立跨空间联系,降低了交易成本,促进了要素自由流动,实现了资源互补整合,发挥了区域整体优势,避免了过度集聚造成的拥塞效应^[10]。学界多数观点认为集聚和网络效应是互补关系^[11],但二者对城市经济产出的影响及协同作用尚未有定论。在此背景下,正确评估城市化进程中由于人口集聚和网络化发展所带来的经济效应,深化对经济产出集聚效应和网络效应的认识,对于促进城市和区域的高质量发展具有重要的理论和实践价值。

传统的城市标度律范式度量了城市要素与城市人口规模之间的非线性关系,其本质是城市交互的结果^[12-13]。以经济产出、财富创造为代表的社会交互类要素与人口规模之间的超线性标度范式,被认为是城市内部人与人之间全局交互的结果^[14],城市内部相互作用导致了城市社会经济要素的规模报酬不断增加,隐含了集聚经济的假设。随着有关标度律机制解释研究的不断深入,城市要素仅取决于城市人口规模(内部交互)这一假设的局限性跃然纸上^[15]。此外,有关超线性标度范式背后反映的社会经济产出的集聚效应还包含了多样的内涵,如空间外部性等。城市非孤立的实体,交互行为不仅发生在城市内部,也存在城市与城市之间^[16-17]。城市在生产活动中获益的可能性不仅取决于该城市的资源禀赋与生产效率^[12, 18-19],也取决于其在网络中的可达性和竞争力^[6, 20-21]。

尽管城市因其嵌入网络所带来的收益及其溢出效应已成为当前研究热点,但少有研究将城市外部交互与网络效应纳入城市标度律解释机制中,并探讨其对城市经济产出的影响。因此,借助城市标度律框架,以城市人口流动刻画外部交互程度,探讨城市经济产出对城市外部交互的响应关系,量化城市人口规模和外部交互对经济产出的影响程度,有助于进一步理解网络效应在区域经济发展中的重要性,丰富对标度律解释机制的认识。从经济地理学理论视角来看,城市人口规模和外部交互分别暗含了集聚经济和网络嵌入的假设,但仅依靠二者作为集聚效应和网络效应的度量和表征略失偏颇。为此,依托拓展的柯布一道格拉斯生产函数方程,进一步构建包含人口密度、集聚与网络外部性影响的城市经济产出基准模型,检验集聚效应和网络效应在中国城市经济发展中的作用,为推动区域高质量一体化发展提供理论依据。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 城市人口流动网络分析

2.1.1 网络构建 短期人口流动主要来自城市之间的商旅联系,侧面反映了城市之间经济社会联系的需求和依赖程度^[22]。本文利用百度迁徙平台(qianxi.baidu.com),获取了2020年9月22日—10月21日中国369个地级及以上级别城市之间逐日人口流动数据。百度城际迁徙数据通过手机定位信息映射用户行动轨迹,采集用户出发地(目的地)、出行方向、迁徙规模等出行信息,依据迁徙规模和迁徙比例计算每个城市与其他城市每日人口流动总量,量化城市之间交互强度。由于该时间段横跨了十一国庆,为消除节假日和数据异常的影响,对原数据进行了降噪处理,选择2020年9月22—30日、2020年10月8—21日两个时间段共计21 d的人口迁徙数据,构建城市人口流动网络,反映城市与城市之间人口要素的流动。需要说明的是,本文统计的是城市样本与之相关联的所有节点城市(最多为368个)之间的人口流动量,而非与其余样本城市之间的流动强度。

2.1.2 网络特征分析 衡量人口流动网络中节点的重要程度,参考现有研究^[6, 12],计算了网络中各节点的节点外部交互强度和PageRank中心性特征。

(1) 节点外部交互强度 (Node Strength)。节点 i 的网络链接强度 C_i^W ，即外部交互强度为：

$$C_i^W = \sum_{j \in N} w_{ij} \quad (1)$$

式中： w_{ij} 为节点 i 和 j 之间的连接边权重，即从 i 到 j 的人口流动规模。

(2) PageRank。对于每个节点 i ，PageRank 算法表征了“冲浪者”在网络的有向链接上随机移动到节点 i 的平稳概率：

$$C_i^{PR} = \frac{1-\alpha}{n} + \alpha \times \sum_{\{j|(i,j) \in A\}} \frac{C_j^{PR}}{k_j} \quad (2)$$

式中： n 为网络中的节点总数； k_j 是节点 j 的链接度数； α 为阻尼因子（取值通常为 0.5），该因子模拟了冲浪者遵循现有的有向链接而不是以均匀概率随机选择任何其他节点的概率。其算法原理为将从城市节点 j 到节点 i 的人口流动强度作为 j 对 i 的一次重要性投票，节点 i 被投票次数越多以及投票的节点 j 在网络中越重要，则节点 i 的得分越高。 C_i^{PR} 值大小衡量了节点 i 在网络中的综合重要程度。

2.2 城市标度律

城市标度律定量测度了城市要素与城市人口规模之间的非线性缩放关系，其分析框架可由以下幂函数形式表示^[12, 23-24]：

$$Y_i(t) = Y_0 N_i(t)^\beta \quad (3)$$

式中： $Y_i(t)$ 表示代表城市要素； $N_i(t)$ 表示城市人口规模； Y_0 为标准化常量； β 为标度因子。一般而言，根据标度因子与 1 的大小关系，可将城市要素分为 3 类：① $\beta > 1$ ：社会交互类要素如 GDP、知识产出、疾病、犯罪等，与城市人口规模呈超线性关系，体现了城市要素的规模报酬递增效应；② $\beta \approx 1$ ，描述与个人需求相关的变量（如就业岗位、住房数量、家庭用水量等），与城市人口规模呈线性关系；③ $\beta \approx 0.85 < 1$ ，描述与基础设施建设相关的变量，与城市人口规模呈次线性关系，表明从小城市到大城市，要素增加率小于人口增加率，体现了城市要素的规模经济特征。

通常对方程 (3) 进行对数变换后采用最小二乘回归对标度因子求解，得到回归方程：

$$\text{Log} Y_i(t) = \text{Log} Y_0 + \beta \text{Log} N_i(t) \quad (4)$$

本文将城市人口规模 $N_i(t)$ 替换为城市外部交互强度 $S_i(t)$ ，测度城市外部交互对城市经济产出 $Y_i(t)$ 的非线性作用。受柯布—道格拉斯生产函数方程的启发^[7]，度量城市人口规模和外部交互对城市要素的协同作用，将 $Y_i(t)$ 定义为城市人口规模与外部交互共同作用的函数，即 $Y \sim F(N, S)$ ，得到以下公式：

$$Y_i(t) \sim Y_0 N_i(t)^{\beta_N} S_i(t)^{\beta_S} \quad (5)$$

$$\text{Log} Y_i(t) \sim \beta_N \text{Log} N_i(t) + \beta_S \text{Log} S_i(t) + \text{Log} Y_0 \quad (6)$$

基于标度不变性，原有衡量 β_N 与 1 关系的标度范式转换为 $\beta_N + \beta_S$ 与 1 的关系，若 $\beta_N + \beta_S > 1$ ，则人口规模 N 和外部交互 S 的协同作用对城市经济产出具有集聚效应，而与其本身无关，对应了城市经济产出的规模报酬递增规律（ N 和 S 增长一倍，而 Y 增长大于一倍）。若 $\beta_N + \beta_S < 1$ ，则意味着规模报酬递减（ N 和 S 增长一倍，而 Y 增长不足一倍），而当 $\beta_N + \beta_S = 1$ 时，即规模报酬不变（ N 和 S 增长一倍意味着 Y 也增长一倍）。

考虑到城市人口规模与城市外部交互二者之间可能存在相互依赖关系，在方程 (6) 的基础上作进一步变换，得到具有交互项的多元回归函数形式：

$$\text{Log} Y_i(t) \sim \beta_N \text{Log} N_i(t) + \beta_S \text{Log} S_i(t) + \beta_c \text{Log} N_i(t) \text{Log} S_i(t) + \text{Log} Y_0 \quad (7)$$

式中： $\text{Log} N_i(t) \text{Log} S_i(t)$ 表示人口规模与外部联系的交互项。

在方程(7)的基础上,参考超越对数成本函数(Transcendental Logarithmic Cost Function, TCF)方程^[15],引入解释变量二次项,得到以下关系式:

$$\begin{aligned} \text{Log}Y_i(t) &\sim \beta_N \text{Log}N_i(t) + \beta_S \text{Log}S_i(t) + \beta_C \text{Log}N_i(t)\text{Log}S_i(t) + \\ &\quad \beta_N(\text{Log}N_i(t))^2 + \beta_S(\text{Log}S_i(t))^2 + \text{Log}Y_0 \end{aligned} \quad (8)$$

2.3 计量方程和变量选择

方程(6)~(8)在标度律框架下考虑了城市人口规模(集聚效应)和外部交互(网络效应)对经济产出的混合效应。城市经济产出毋庸置疑也受到其他因素(如技术生产水平等)的影响,为此需进行变量控制,捕捉除集聚效应和网络效应以外其他因素的影响。以柯布一道格拉斯生产函数模型为基础,引入更广泛的指标表征和度量城市人口集聚和网络效应,建立城市人口集聚效应和网络效应对经济产出的基准回归模型:

$$\text{Log}Y_{it} = \beta_1 \text{LogAgglomeration}_{it} + \beta_2 \text{LogNetwork}_{it} + \beta_3 \text{Log}X_{it} + \text{Log}Y_0 + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中: Y_{it} 为地区生产总值(GDP),表征地区经济产出水平; $\text{Agglomeration}_{it}$ 为城市人口集聚效应; Network_{it} 为网络效应; X_{it} 为控制变量; $\text{Log}Y_0$ 为常数项; β_1 、 β_2 和 β_3 为有待估计的参数; ε_{it} 为残差。

2.3.1 核心解释变量 城市集聚效应由城市人口规模、城市人口密度^[25-27]和集聚外部性指标表征。城市人口规模和密度客观地反映了城市内部人口集聚特征^[26]。人口密度定义为常住人口数量与建成区面积的比值^[28],集聚外部性则通过引入空间滞后变量进行测度,通过构建空间邻接矩阵(W_{ij}),若城市*i*和*j*相邻(行政边界具有相同的边或者顶点),则 W_{ij} 为1,反之为0,测度基于地理邻近性的集聚经济外部性水平。

考虑到网络指标的代表性与避免回归共线性问题的出现,选取外部交互强度、PageRank和网络外部性(网络滞后变量)作为网络效应测度指标,测度了节点城市在网络中的地位 and 等级,识别其特征属性及重要性。而网络外部性度量了城市经济产出通过人口流动网络联系产生的溢出效应。参考盛科荣等^[6]的做法,以人口流动比重为权重,构建网络联系权重矩阵量化网络外部性水平:

$$N\text{LogGDP}_i = \sum \text{GDP}_j \times \text{Strength}_{ij} / \sum \text{Strength}_{ij} \quad (10)$$

式中: GDP_j 表示相联系的城市*j*的经济产出; $\text{Strength}_{ij} / \sum \text{Strength}_{ij}$ 表示城市*i*与*j*人口流动强度占城市*i*总外部交互强度的比重。对网络效应解释变量进行初步分析发现,外部交互强度、PageRank和网络滞后变量偏度系数分别为3.26、0.68和1.56,峰度系数分别为15.23、2.27和6.92,呈现正偏态分布特征。故对网络变量取对数,使其服从正态分布。

2.3.2 控制变量 参照相关研究^[6, 25],本文选取财政支出、固定资产投资、产业结构比重、专利申请数作为回归方程的控制变量。

(1) 财政支出:城市经济发展离不开政府的政策支持与财政投入,公共财政支出体现了政府通过投资公共产品和服务等方式对经济发展质量进行积极的干预,提高地方资源配置效率。本文采用“地方一般公共预算支出”表征政府对城市经济发展的投入水平。

(2) 固定资产投资:相关研究表明中国城市经济增长在很大程度上是由投资驱动的,固定资产投资对产业结构调整、技术创新水平和生产要素提高均具有显著影响。本研究采用“规模以上工业企业固定资产合计”表征资本投入水平。

(3) 产业结构:由制造业和服务业产值比重表征。经济发展受制于结构的调整 and 产业的变迁,在很大程度上由产业结构决定。中国众多城市的经济生产仍以制造业为主,但服务业正成为当前城市发展中越来越重要的产业,二者都在城市经济发展中发挥着重要的作用。

(4) 专利数: 技术创新水平决定了个体规模报酬递增或递减程度, 是城市经济发展的核心动力^[29]。本文以专利申请数来代表城市技术创新水平和知识生产能力。

2.4 研究对象与数据来源

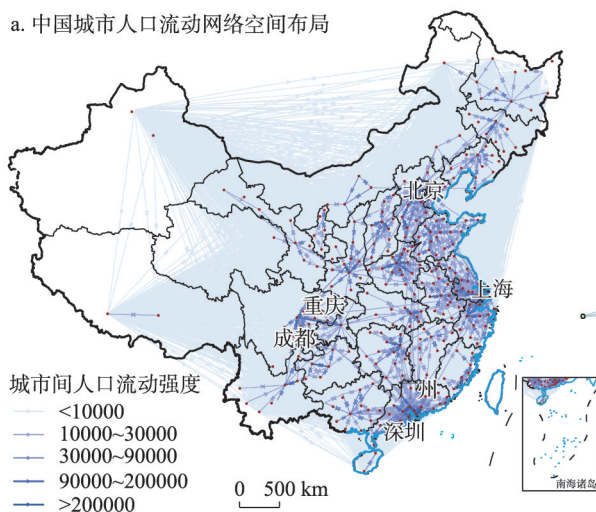
本文以中国 275 个地级及以上城市为研究对象, 为遵循实体地域和功能城市概念, 统计口径界定为市辖区范围^[23, 30]。城市层面的统计数据来自《2021 年中国城市统计年鉴》《2020 年中国城市建设统计年鉴》及各地级市国民经济与社会发展统计公报。专利申请数据来源于国家知识产权局网站 (www.pss-system.cnipa.gov.cn)。为保证数据量级的一致性, 空间滞后变量、网络滞后变量均以对数的形式进入回归方程。对各非比例变量取自然对数, 保证数据原有的协整关系, 避免回归出现严重的共线性和异方差问题。

3 结果分析

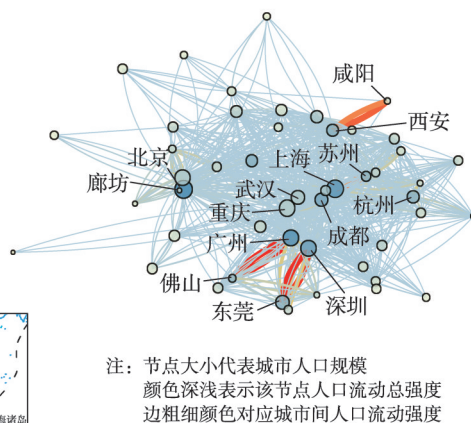
3.1 城市人口流动网络特征描述性分析

中国城市短期人口流动频繁区域集中在珠三角、京津冀、长三角和成渝城市群内, 且多发生在区域核心城市与邻近城市之间, 省内迁徙是人口流动的主要路径 (图 1a)。图 1b 展示了人口流动强度 Top50 的城市人口流动关联关系。广州—佛山, 深圳—东莞, 西安—咸阳, 北京—廊坊, 上海—苏州为城市人口流动最频繁的前 5 个城市对, 流入流出城市之间呈现双向互动倾向, 流入流出量相当, 反映了地理邻近性的特征。在样本城市中, 全国人口流动网络外部交互强度前 5 位城市分别为广州 (413 万人次)、北京 (412 万人次)、上海 (359 万人次)、深圳 (354 万人次) 和成都 (298 万人次), 而最小值城市日喀则仅为 5.0 万人次, 城市人口流动空间异质性特征显著。短期省际人口流动特征不明显, 高权重省跨省域人口流动以北京—上海 (5.8 万人次), 北京—成都 (3.1 万人次), 北京—西安 (3.0 万人次) 较为突出, 人口流动网络菱形结构初见端倪; 但珠三角对菱形网络的支撑力不足, 跨省域高权重联系相对较弱, 使得人口流动网络菱形格局较为破碎。

a. 中国城市人口流动网络空间布局



b. 人口流动强度前50名城市力导向图



注: 基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS2016(1569)号的标准地图制作, 底图边界无修改

图1 2020年中国城市月度人口流动网络联系

Fig. 1 Monthly urban human mobility network in China in 2020

3.2 城市人口标度律与外部交互网络标度律比较

对城市人口规模、城市外部交互强度与GDP分别进行对数变换并做拟合散点图（图2）发现，城市经济产出与城市外部交互强度之间也存在显著的标度关系，且呈现超线性范式（ $\beta_s > 1$ ）。城市经济产出与外部交互拟合得到的标度因子约为 1.21 ± 0.05 ，而城市人口规模的标度因子则为 1.16 ± 0.03 ， $\beta_s > \beta_p$ ，表明城市外部交互带来的经济集聚效应更为显著。进一步来看，城市经济产出与城市人口规模的标度关系拟合程度更高，城市人口规模标度律更为稳健。而城市经济产出与外部交互强度数据拟合更为离散，拟合优度 R^2 仅为0.69。综上，城市经济产出与城市人口规模之间的标度关系更为稳健，但城市外部交互强度对城市经济产出具有更高的乘数效应与集聚优势。

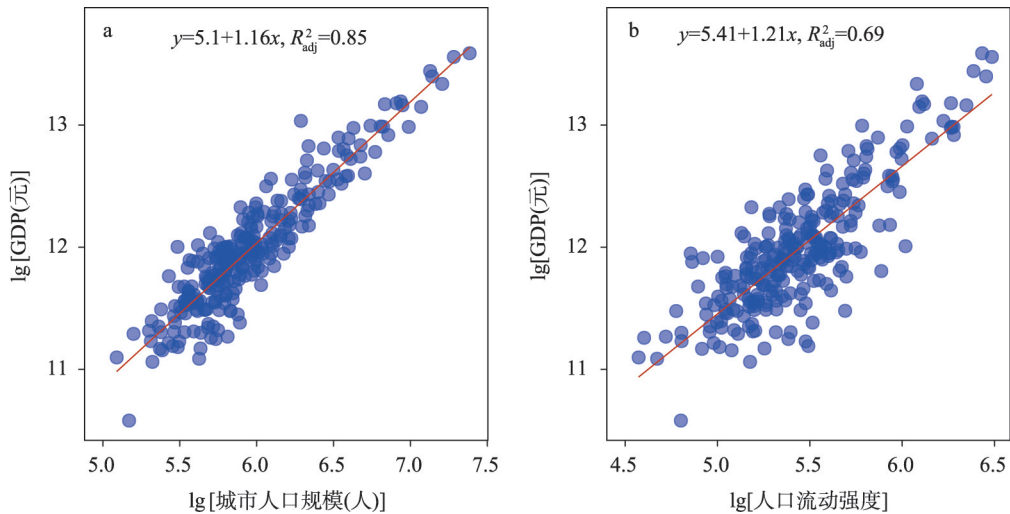


图2 对数坐标下的城市人口规模和外部交互强度与地区生产总值拟合散点图

Fig. 2 Scatter plot of urban population size and external interaction intensity and GDP fitting under logarithmic coordinates

将城市内部人口规模和外部交互强度同时纳入回归方程（ $VIF = 3.103$ ），在标度律的框架下考虑外部交互强度的混淆效应。相较于模型1，模型3中人口规模系数（ $\beta_N = 0.935$ ）比城市人口标度律标度因子（ $\beta = 1.156$ ）更小（ $p < 0.001$ ），且 R^2 由模型1的0.851上升至0.865，再次证明了城市标度律同时受到城市内外部交互效应的影响，验证了城市标度律同时源于内外部交互的假设。同时考虑城市内外部交互对城市经济产出的影响能有效减少传统标度律下观察到的实际值与预期值的偏差，随着城市人口规模的扩大和城市之间交互的加强，城市经济要素生产率不断改善，有效促进了城市经济增长。

在仅考虑人口规模和外部交互对城市经济产出的共同作用下， $\varepsilon = \beta_N + \beta_s = 1.248 > 1$ ，人口规模和外部交互每增加1%，其经济产出就会增加1.248%。城市经济产出效率随城市内外部交互综合作用的增加而增加，再次体现了城市经济产出的规模报酬递增规律。模型4引入了人口规模与外部联系的交互项，这种相互作用使得人口规模对GDP的影响取决于外部交互强度，反之外部交互强度对GDP的影响也同样取决于人口规模。在 $p < 0.05$ 水平下，交互项回归系数并不显著且并未对模型整体精度产生显著影响。而模型5同时引入交互项和二次项，模型方差解释率上升至86.9%，进一步减少了模型1和模型3观察到的偏差。原核心解释变量（人口规模和外部交互）系数为正但未通过显著性测试，而人口规模与外部交互的交互项与二次项在 $p < 0.05$ 水平下为负且显著。

表1 城市人口规模和城市外部交互与地区生产总值回归结果

Tab. 1 Regression results of effects of urban population size and interurban interactions on GDP

变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
人口规模	1.156*** (0.029)		0.935*** (0.049)	0.890* (0.356)	1.113 (0.819)
外部交互		1.210*** (0.050)	0.313*** (0.057)	0.266 (0.370)	0.072 (1.033)
交互项				0.008 (0.064)	0.759* (0.313)
人口规模二次项					-0.362* (0.163)
外部交互二次型					-0.393* (0.179)
常数项	5.098*** (0.175)	5.406*** (0.027)	4.713*** (0.181)	4.978* (2.100)	4.851* (2.124)
R ²	0.851	0.686	0.865	0.866	0.869
AIC	-110.600	92.869	-137.282	-135.298	-137.391
BIC	-99.772	103.697	-122.844	-117.251	-112.124

注: ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$ 。

3.3 城市人口集聚和城市间人口流动网络对经济产出的影响

进一步考虑城市人口集聚效应和网络效应对经济产出的影响,表2回归结果中的方差膨胀因子VIF均小于10,方程不存在共线性问题,保证了最小二乘回归的最佳线性无偏性。从模型1与模型2可以看出,在规模和集聚效应作用下,城市人口规模和集聚外部性系数为正且分别在 $p < 0.001$ 和 $p < 0.05$ 水平下显著,表明人口规模和外部性始终是影响城市经济增长的重要因素。人口集聚对城市经济产出的影响取决于城市集聚效应与拥挤效应的综合作用^[31],在本文中当规模和密度同时纳入方程,在其他解释变量保持不变的前提下(此时规模不变),人口密度越高(等价于规模不变,土地投入减少)带来了经济产出的减少($p < 0.05$)。

表2 基准回归结果

Tab. 2 Regression results from benchmark models

变量	模型1	模型2	模型3	模型4	模型5
集聚效应	人口规模	1.209*** (0.031)	0.558*** (0.046)		0.507*** (0.051)
	人口密度	-0.466*** (0.116)	-0.157* (0.075)		-0.161* (0.086)
	集聚外部性	0.120 (0.010)	0.033* (0.016)		0.035* (0.022)
网络效应	外部交互		1.061*** (0.064)	0.262*** (0.053)	0.109* (0.051)
	PageRank		1.437*** (0.411)	0.044 (0.216)	0.116 (0.200)
	网络外部性		0.025 (0.018)	0.033 (0.019)	-0.017 (0.010)
控制变量	财政支出		0.272*** (0.041)	0.533*** (0.043)	0.269*** (0.043)
	专利数		0.116*** (0.020)	0.137*** (0.025)	0.102*** (0.020)
	产业结构		0.188*** (0.024)	0.188*** (0.030)	0.208*** (0.026)
	固定资产投资		0.195*** (0.024)	0.191*** (0.033)	0.184*** (0.025)
	常数项	0.863*** (0.168)	5.764*** (0.287)	9.884*** (1.252)	5.688*** (0.691)
	R ²	0.861	0.945	0.703	0.927
	VIF最大值	1.250	6.699	2.037	4.558
	VIF均值	1.171	3.362	1.696	2.916

注: ***: $p < 0.001$, **: $p < 0.01$, *: $p < 0.05$ 。

比较网络效应对城市经济产出的影响发现（模型3），外部交互强度和PageRank系数为正且在 $p<0.001$ 水平下显著，表明当城市融入网络程度越深、在网络中处于越核心的地位，可以更加充分发挥比较优势和网络效应，促进本地经济发展水平的提高。网络外部性系数在模型3~模型5中均未通过显著性测试，即在当前城市发展中，网络外部性未对城市经济产出产生显著影响。比较集聚外部性和网络外部性效应发现，当前周边城市经济发展、技术合作和信息共享所带来的空间溢出和知识扩散效应更有效地促进了地方经济发展水平的提高，而更大空间尺度上城市之间的网络合作带来的生产效率有待进一步加强。

利用标准化回归系数、Lindeman-Merenda-Gold（LMG）、偏相关等方法衡量集聚效应和网络效应对经济产出的相对贡献程度，LMG方法将 R^2 分解为各自变量对因变量的贡献程度，避免了回归变量的阶次效应^[9]。从图3a可以发现，在仅考虑城市内外部交互作

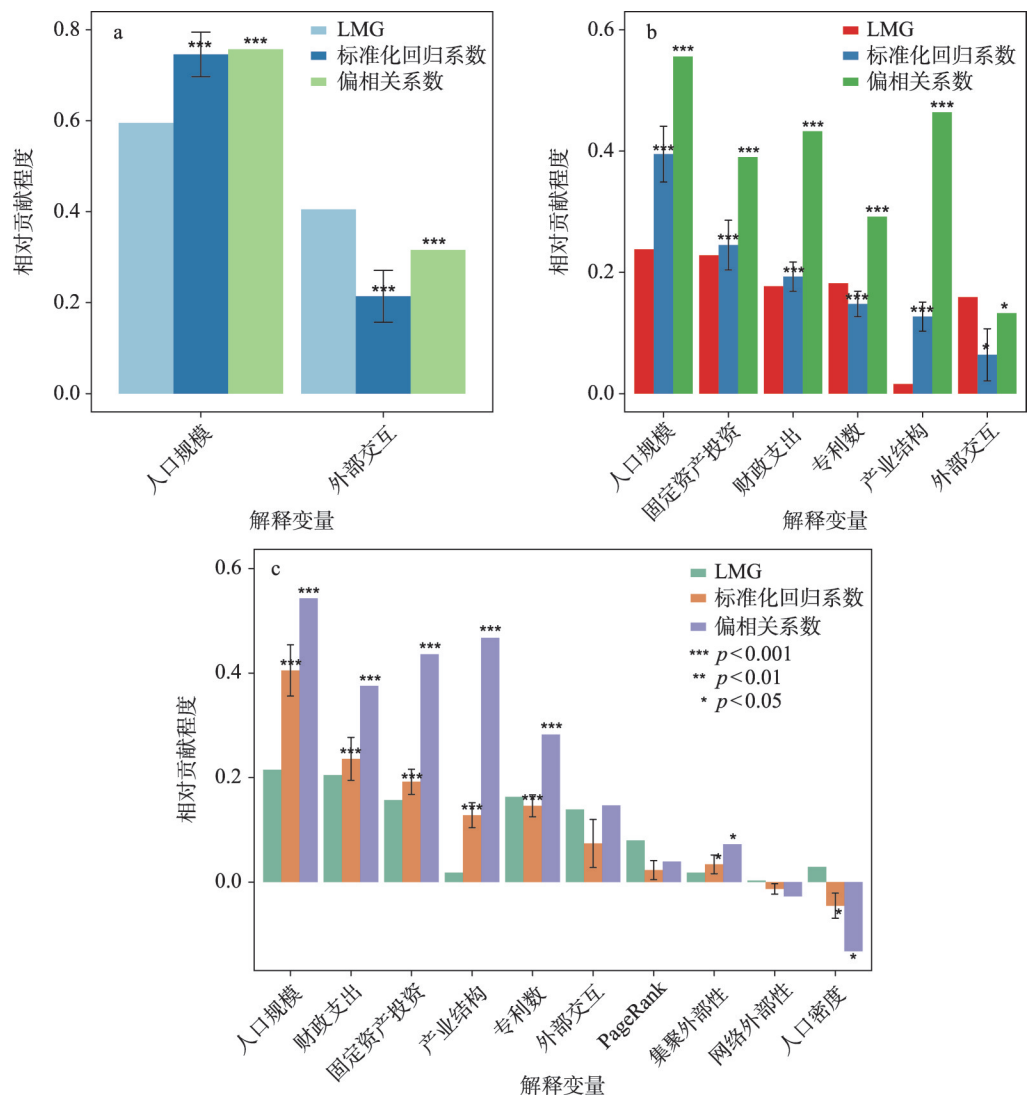


图3 集聚效应和网络效应指标对经济产出的相对贡献程度

Fig. 3 Relative contribution of each agglomeration and network effect variables to explained variable

用对经济产出影响时（表1模型3），内外部交互作用的相对贡献程度之比约为3:2，网络效应对经济产出贡献显著，可作为内部集聚效应的补充；但加入财政支出、专利数等控制变量后，网络效应的贡献程度被削弱，且变得不显著。同样地，依据表2模型5所构建的回归方程衡量集聚效应和网络效应的贡献程度（图3c），人口规模带来的集聚效应和本地影响因素的贡献程度较网络外部交互更大，在考虑其他变量控制情况下，人口规模带来的经济产出集聚效应贡献程度约为22%。

考虑到人口流动网络可能对经济产出存在内生效应，选择节点度（节点连接个数）作为节点外部交互强度的工具变量，采用两阶段最小二乘法（2SLS）解决回归的内生性问题并进行稳健性检验（表3）。结果表明，外部交互强度系数在模型6与模型7中均显著为正（ $p < 0.001$ ， $p < 0.05$ ），PageRank系数在模型6中显著为正（ $p < 0.05$ ），表明节点城市在网络中等级越高、处于越核心的地位对城市经济增长具有较为稳健的正向影响。而在模型8加入人口集聚效应等指标后，网络特征对经济产出的影响被削弱且变得不显著（ $p > 0.05$ ），对经济产出的解释力还有待加强。同样的，网络外部性系数在模型6~模型8中均未通过显著性检验（ $p > 0.05$ ），表明网络外部性对城市经济表现的影响并不显著，城市人口规模带来的集聚效应仍是区域经济发展的主要动力，城市在更大空间尺度上的网络效应还有待增强。

表3 两阶段最小二乘法稳健估计结果
Tab. 3 Robust estimation results from two-stage least squares method

变量		模型6	模型7	模型8
集聚效应	人口规模			0.626*** (0.083)
	人口密度			-0.124* (0.084)
	集聚外部性			0.047* (0.019)
网络效应	外部交互	1.072*** (0.175)	0.285* (0.052)	0.258 (0.197)
	PageRank	1.393* (0.776)	0.036 (0.233)	0.509 (0.286)
	网络外部性	0.026 (0.021)	0.033 (0.014)	0.032 (0.013)
控制变量	财政支出		0.529*** (0.041)	0.258*** (0.046)
	专利数		0.133*** (0.027)	0.158*** (0.038)
	产业结构		0.192*** (0.031)	0.171*** (0.033)
	固定资产投资		0.189*** (0.035)	0.208*** (0.029)
	常数项	4.724 (2.719)	5.484 (1.904)	2.222 (1.179)
	Durbin	0.004	0.005	0.031
	Wu-Hausman	0.004	0.006	0.035
	R ²	0.706	0.883	0.936

注：***： $p < 0.001$ ，**： $p < 0.01$ ，*： $p < 0.05$ 。

4 讨论与结论

4.1 讨论

城市标度律观察到的城市经济产出与城市人口规模之间的超线性标度关系可归因为城市内部日益增强的社会互联性^[32]，对单个城市而言，知识溢出驱动了城市经济增长，实现集聚效益，这种溢出和集聚效应又吸引着人口、生产等要素进一步集聚，城市越大社会生产效率越高^[12, 26]。同时，由于集聚产生的外部性也带动了周边城市的发展，区域

一体化程度伴随着人口集聚不断加深^[30, 33]。毋庸置疑,除城市内部交互外,其他外生因素也是社会生产效率提高的重要原因。城市标度律区分了由局部动态和由人口规模变化引起的规模增长的影响,其观察到人口规模相近的两个城市经济产出之间的差异(实际值与预期值之间的偏差)并不是随机的^[16-17, 34-35],除人口规模外,还有其他因素影响城市经济的发展,塑造了城市系统不同的发展状态。从解释机制出发,本文发现正是城市与城市之间的交互与网络联系导致了这些差异,进而对城市经济生产效率产生影响。

城市人口集聚效应和人口流动网络效应作为城市化和经济发展的重要推动力量,在局部和跨区域经济活动中带来了明显的基础设施规模化成本节约与知识外溢,而大城市,尤其是处于网络层级核心地位的城市,正借助集聚效应和网络效应成为城市化进程的主要受益者。在经济全球化的背景和生产要素流动日益增强的环境下,城市发展前景也越来越多地依赖他们所处的网络空间,尤其是其在网络中的地位 and 声望。在网络中处于更高地位、拥有更好可达性的城市在经济合作、经验交流中具备更强的竞争力^[5]。而现阶段,与城市人口集聚带来的经济产出规模报酬递增效应相比,无论是节点城市发挥其在网络层级中的比较优势与权力地位,亦或嵌入网络通过节点之间相互连接的互补、整合或协同作用而发挥外部性优势的能力都还有所欠缺。虽然城市外部交互与经济要素之间存在更强的超线性关系,但这种规模报酬递增效应是不稳定的,尤其是考虑了技术进步、资本存量等本地影响因素后,网络效应对经济产出的影响被削弱。可以看出,现阶段大多数的生产活动还依赖于当地相关基础设施建设和资源禀赋,地理空间对区域经济增长的影响和约束依旧比较明显,即短期内城市经济产出更大程度上依赖于城市人口集聚和地理邻近性产生的集聚效应。因此,有必要合理引导资源和产业向中小城市流动,发挥区域核心城市集聚效应的重要作用,推动城市群整体的经济增长与可持续发展。

本文研究发现,城市外部交互能给城市经济产出带来更大的乘数效应,显示了城市网络发展对其经济产出的关键促进作用。结合已有研究^[17],在人口规模不变的情况下,中国城市人口流动强度对经济产出的影响(0.30%)介于美国(0.10%)和巴西(0.33%)之间。美国的城市劳动力市场的整合程度更高,人口流动网络更优化,通勤网络和人口流动对城市经济产出的影响较小。而巴西的经济发展受限于基础设施建设,其通勤网络还未达到最优状态。与巴西城市化进程类似,在快速城市化背景下,中国公共资源不断向大城市集聚,基础设施在大城市覆盖更广^[30, 36]。而中小城市往往由于市场潜力较小、关键资源稀缺,社会经济发展受限于基础设施建设带来的负面效应,尤其在网络层级中处于外围的城市。相应的,这也可能反过来解释了中国城市经济产出对外部交互具有更大的依赖性,暗含了中小城市经济产出增长的潜在可能性。

受数据限制,本文仅以短期人口流动网络度量城市经济增长的网络效应,人口流动和出行目的多样,相较于企业、投融资等经济网络^[6],人口流动在某种意义上并非城市间经济活动交流最恰当的表征,而是一种更偏向于对城市综合联系的度量。作为区域要素流动的载体,人口流动传递了资本、劳动力、技术等生产要素与非物质信息,一定程度上体现了城市间的功能关联和优势互补^[37]。从复杂系统和标度律机制解释视角来看,城市人口流动不仅与人口规模表征的城市内部相互作用相对应,而且更全面地衡量了城市之间的交流与联系,准确刻画了城市外部交互强度。但不可避免地也存在一些局限性:迁徙数据边界采用的是城市行政区划范围,是自上而下的行政范围,而开展城市标度律研究的前提是城市单元的选取要符合功能城市与实体地域的概念,这可能会对全面准确衡量城市人口流动网络效应造成一定影响。除此之外,迁徙数据不包含流动个体的年

龄、性别、出行目的等属性信息,无法对出行人群进行区分,也无法匹配个体迁徙行为与社会经济属性。相关研究发现,社会交互类因素与人口规模之间的超线性关系约一半可归因为城市社会互联互通的增加,其本质上反映的是城市社会人口组成、城市经济和社会活动组织以及物理基础设施的多样性等方面的差异^[20]。

在推动经济转型、产业升级的背景下,社会生产要素,尤其是创新型生产要素,在不同规模城市之间的转移是借助一定的社会网络进行的,遵循一条大城市在前小城市紧随其后的发展路径^[38]。不同类型生产活动所处发展阶段各异,对网络效应的响应也是不同的,未来有必要结合标度律的演化特征^[39],对城市网络效应的多尺度性与异质性特征进行深入探讨。

4.2 结论

本文以人口流动刻画城市间相互作用的强度,基于城市标度律视角探讨了城市经济的集聚效应和网络效应。研究发现,城市经济产出与城市外部交互之间遵循显著的标度关系,且标度因子均显著大于1,表现出极强的超线性特征。城市经济产出与人口规模之间的标度关系更为稳健,但城市外部交互对于城市经济产出具有更高的乘数效应。城市社会经济总量的人均增长可归因于城市内部交互网络的超线性扩展,城市人口规模和城市外部交互在经济发展中的作用均不容忽视。该发现验证了城市标度律同时源于城市内外部交互的假设,弥补了传统标度律在机制解释方面的不足。

城市经济产出与人口规模和外部交互之间的超线性标度范式也暗含了城市人口集聚和嵌入网络带来的城市经济产出的集聚和网络效应。依托柯布—道格拉斯生产函数方程,引入人口密度、集聚和网络外部性等要素进一步探讨了城市经济产出的集聚和网络效应。结果发现,城市人口规模带来的集聚效应仍是当前区域经济发展的重要影响因素,区域经济发展更依赖于本地的资源优势。城市外部交互对经济增长具有显著的正向促进作用,该效应主要通过凸显城市在网络中的等级地位和重要性而发挥,网络地位越高、拥有更多资源的城市,可以充分发挥比较优势和网络效应,促进本地经济发展水平的提高。值得注意的是,虽然中国社会经济产出对外部交互具有更大的依赖性,但在当前发展阶段下,城市人口流动带来的网络效应是不稳定的,尤其是考虑了本地资源优势后,网络效应对经济产出的影响被削弱。在地理邻近网络和人口流动权重网络下,基于地理邻近性的空间溢出效应较网络溢出效应更为明显,人口规模对本地经济增长具有显著的正向溢出效应,而城市外部交互对本地经济增长溢出效应在统计上不显著,城市在更大空间尺度上由于相互联系而从网络中合作获益的能力还有待增强。本文深化了对中国经济集聚效应和网络效应的认识,为推动城市高质量一体化发展和深化区域协调发展实践提供支持。

参考文献(References)

- [1] Castells M. Globalisation, networking, urbanisation: Reflections on the spatial dynamics of the information age. *Urban Studies*, 2010, 47(13): 2737-2745.
- [2] Wu Kang, Fang Chuanglin, Zhao Miaoxi. The spatial organization and structure complexity of Chinese intercity networks. *Geographical Research*, 2015, 34(4): 711-728. [吴康, 方创琳, 赵渺希. 中国城市网络的空间组织及其复杂性结构特征. *地理研究*, 2015, 34(4): 711-728.]
- [3] Wang Lucang, Liu Haiyang, Liu Qing. China's city network based on Tencent's migration big data. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 853-869. [王录仓, 刘海洋, 刘清. 基于腾讯迁徙大数据的中国城市网络研究. *地理学报*, 2021, 76(4): 853-869.]
- [4] Lu Jun, Mao Wenfeng. The rise of urban network externalities: A new mechanism for the high-quality integrated

- development of regional economy. *Economist*, 2020(12): 62-70. [陆军, 毛文峰. 城市网络外部性的崛起: 区域经济高质量一体化发展的新机制. *经济学家*, 2020(12): 62-70.]
- [5] Capello R. The city network paradigm: Measuring urban network externalities. *Urban Studies*, 2000, 37(11): 1925-1945.
- [6] Sheng Kerong, Zhang Jie, Zhang Hongxia. Network embedding and urban economic growth in China: A study based on the corporate networks of top 500 public companies. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(4): 818-834. [盛科荣, 张杰, 张红霞. 上市公司 500 强企业网络嵌入对中国城市经济增长的影响. *地理学报*, 2021, 76(4): 818-834.]
- [7] Meijers E J, Burger M J, Hoogerbrugge M M. Borrowing size in networks of cities: City size, network connectivity and metropolitan functions in Europe. *Papers in Regional Science*, 2016, 95(1): 181-198.
- [8] Camagni R, Capello R, Caragliu A. Static vs. dynamic agglomeration economies: Spatial context and structural evolution behind urban growth//Capello R. *Seminal Studies in Regional and Urban Economics*. Berlin: Springer, 2017: 227-259.
- [9] Bonaventura M, Aiello L M, Quercia D, et al. Predicting urban innovation from the US Workforce Mobility Network. *Humanities and Social Sciences Communications*, 2021, 8: 10. DOI: 10.1057/s41599-020-00685-7.
- [10] Boix R, Trullén J. Knowledge, networks of cities and growth in regional urban systems. *Papers in Regional Science*, 2007, 86(4): 551-574.
- [11] Cheng Yuhong, Su Xiaomin. Review on the urban network externalities. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 713-720. [程玉鸿, 苏小敏. 城市网络外部性研究述评. *地理科学进展*, 2021, 40(4): 713-720.]
- [12] Bettencourt L M A, Lobo J, Helbing D, et al. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [13] Bettencourt L M A. The origins of scaling in cities. *Science*, 2013, 340(6139): 1438-1441.
- [14] Dong L, Huang Z, Zhang J, et al. Understanding the mesoscopic scaling patterns within cities. *Scientific Reports*, 2020, 10: 21201. DOI: 10.1038/s41598-020-78135-2.
- [15] Ribeiro H V, Rybski D, Kropp J P. Effects of changing population or density on urban carbon dioxide emissions. *Nature Communications*, 2019, 10: 3204. DOI: 10.1038/s41467-019-11184-y.
- [16] Lei W Q, Jiao L M, Xu Z B, et al. Scaling of urban economic outputs: Insights both from urban population size and population mobility. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2021, 88: 101657. DOI: 10.1016/j.compevurbysys.2021.101657.
- [17] Alves L G A, Rybski D, Ribeiro H V. Commuting network effect on urban wealth scaling. *Scientific Reports*, 2021, 11: 22918. DOI: 10.1038/s41598-021-02327-7.
- [18] Eagle N, Macy M, Claxton R. Network diversity and economic development. *Science*, 2010, 328(5981): 1029-1031.
- [19] Makarem N P. Social networks and regional economic development: The Los Angeles and Bay Area metropolitan regions, 1980-2010. *Environment and Planning C: Government and Policy*, 2016, 34(1): 91-112.
- [20] Keuschnigg M, Mutgan S, Hedström P. Urban scaling and the regional divide. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaav0042. DOI: 10.1126/sciadv.aav004.
- [21] Liu Linqing, Tan Chang. Effects of export structure on economic performance: A view from social network analysis. *Journal of International Trade*, 2016(6): 15-27. [刘林青, 谭畅. 国际贸易中出口结构对经济绩效的影响: 基于国家空间的社会网络分析. *国际贸易问题*, 2016(6): 15-27.]
- [22] Shi Cheng, Tian Lin, Cheng Yao. Research on spatial organization of Yangtze River Delta urban agglomeration from the perspective of short-term population mobility: An empirical study on travel data recognition based on cell phone signaling data. *Urban & Rural Planning*, 2020(6): 105-115. [施澄, 田琳, 程遥. 短期人口流动视角下的长三角城市群空间组织研究: 基于手机信令数据对出行数据识别的实证. *城乡规划*, 2020(6): 105-115.]
- [23] Dong Lei, Wang Hao, Zhao Hongrui. The definition of city boundary and scaling law. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(2): 213-223. [董磊, 王浩, 赵红蕊. 城市范围界定与标度律. *地理学报*, 2017, 72(2): 213-223.]
- [24] Gong Jianya, Xu Gang, Jiao Limin, et al. Urban scaling law and its application. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(2): 251-260. [龚健雅, 许刚, 焦利民, 等. 城市标度律及应用. *地理学报*, 2021, 76(2): 251-260.]
- [25] Chen Le, Li Xun, Yao Yao, et al. Effects of population agglomeration on urban economic growth in China. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(6): 1107-1120. [陈乐, 李郇, 姚尧, 等. 人口集聚对中国城市经济增长的影响分析. *地理学报*, 2018, 73(6): 1107-1120.]
- [26] Jiang Manqi, Xi Qiangmin. Measurement of major urbanization areas in china: Based on the perspective of population aggregation. *Social Sciences in China*, 2015(8): 26-46, 204. [江曼琦, 席强敏. 中国主要城市化地区测度: 基于人口聚

- 集视角. 中国社会科学, 2015(8): 26-46, 204.]
- [27] Ciccone A, Hall R E. Productivity and the density of economic activity. *The American Economic Review*, 1996, 86(1): 54-70.
- [28] Xu Gang, Zheng Muchen, Wang Yaxing, et al. The urbanization of population and land in China: Temporal trends, regional disparities, size effect and comparisons of measurements. *China Land Science*, 2022, 36(5): 80-90. [许刚, 郑沐辰, 王亚星, 等. 中国人口与土地城镇化: 演化趋势、区域和规模差异及测度方法比较. *中国土地科学*, 2022, 36(5): 80-90.]
- [29] Romer P M. Increasing returns and long-run growth. *Journal of Political Economy*, 1986, 94(5): 1002-1037.
- [30] Jiao Limin, Lei Weiqian, Xu Gang, et al. Urban scaling and the spatio-temporal characteristics of scaling exponents in China. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75(12): 2744-2758. [焦利民, 雷玮倩, 许刚, 等. 中国城市标度律及标度因子时空特征. *地理学报*, 2020, 75(12): 2744-2758.]
- [31] Henderson J V. The effects of urban concentration on economic growth. National Bureau of Economic Research Working Paper, 2000. <http://www.nber.org/papers/w7503>.
- [32] Schl pfer M, Bettencourt L M A, Grauwin S, et al. The scaling of human interactions with city size. *Journal of the Royal Society, Interface*, 2014, 11(98): 20130789. DOI: 10.1098/rsif.2013.0789.
- [33] Wang Yuanyu, Yang Kaizhong. Agglomeration economy, urban productivity and optimal scale. *Statistics & Decision*, 2022, 38(2): 94-98. [王媛玉, 杨开忠. 集聚经济、城市生产率与最优规模. *统计与决策*, 2022, 38(2): 94-98.]
- [34] Xiao Y X, Gong P. Removing spatial autocorrelation in urban scaling analysis. *Cities*, 2022, 124: 103600. DOI: 10.1016/j.cities.2022.103600.
- [35] Gomez-Lievano A, Youn H, Bettencourt L M A. The statistics of urban scaling and their connection to zipf's law. *Plos One*, 2012, 7(7): e40393. DOI: 10.1371/journal.pone.0040393.
- [36] Lei W Q, Jiao L M, Xu G, et al. Urban scaling in rapidly urbanising China. *Urban Studies*, 2022, 59(9): 1889-1908.
- [37] Feng Zhangxian, Zhang Yu, Wei Ye., et al. Spatial-temporal pattern and dynamic mechanism of population flow of Changchun City during Chunyun period based on Baidu migration data. *Economic Geography*, 2019, 39(5): 101-109. [冯章献, 张瑜, 魏冶, 等. 基于百度迁徙数据的长春市春运人口流动时空格局与动力机制. *经济地理*, 2019, 39(5): 101-109.]
- [38] Hong I, Frank M R, Rahwan I, et al. The universal pathway to innovative urban economies. *Science Advances*, 2020, 6(34): eaba4934. DOI: 10.1126/sciadv.aba49.
- [39] Pumain D, Paulus F, Vacchiani-Marcuzzo C, et al. An evolutionary theory for interpreting urban scaling laws. *Cybergeog: European Journal of Geography*, 2006. DOI: 10.4000/cybergeog.2519.

The impacts of urban population agglomeration and human mobility on economic performance

LEI Weiqian¹, JIAO Limin^{1,2}

(1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geographic Information System, Ministry of Education,
Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: As a product of certain type of social interaction, urban scaling laws assume that urban attributes such as urban economic outputs are largely determined by urban population size (internal interactions), implying the assumption of agglomeration economies. Urban population agglomeration represents a local network effect, while the global network effect on a larger spatial scale between cities should also be considered in terms of the improvement of social productivity. Taking 275 Chinese cities at prefecture level and above as the research object, we constructed an urban human mobility network by Baidu migration data and portrayed the degree of external interaction by human mobility between cities. We comparatively analysed the non-linear relationship between population size within cities and external interaction and urban economic outputs under the urban scaling framework. Results show that there is a significant super-linear scaling relationship between urban economic output and external interaction, revealing the higher multiplier effect of external interaction on urban economic outputs. The role of network spatial interaction cannot be ignored and it has become an important complement to agglomeration economies. Further, indicators such as urban population density, agglomeration and network externalities are introduced to quantitatively and comprehensively measure the effects of urban population agglomeration and interurban population mobility and their synergistic effects on urban economic outputs. The agglomeration effect brought about by urban population size remains the main driver of regional economic development, and the ability of cities to benefit from exchange and cooperation on a larger spatial scale has yet to be enhanced. This study contributes to fully understanding the origins of urban scaling laws from taking both internal and external interaction into consideration, deepening the recognition of the agglomeration effect and network effect of regional economic growth. This paper is supposed to support for promoting high-quality integrated urban development and deepening the practice of coordinated regional development.

Keywords: agglomeration effects; network effects; urban scaling laws; human mobility; economic efficiency