城市的标度效应：体量、规模与形状*

Urban Scaling Revisited: Size, Scale, and Shape

迈克•巴蒂　沈　尧 著　　沈　尧　胡玶妍 译　　Michael BATTY, SHEN Yao; SHEN Yao, HU Pingyan (translators)

摘　要 归纳了4组城市标度效应，用以描述和解释城市及其空间区位随规模变化的理论与方法。“城市标度律”指的是城市各类规模要素随城市发展而变化的趋势，如人口增长等，其反映了城市系统间的时序演化关系。这些关系涵盖了城市位序与规模法则、基于区位的人口密度函数、基于空间距离的空间相互作用引力模型，以及与城市规模相关的社会经济要素（如收入等）随着城市规模扩张的异速增长规律。这些规则可以被4个定律所解释，分别是齐普夫定律（Zipf's Law）、克拉克定律（Clark's Law）、托布勒定律（Tobler's Law）和马歇尔定律（Marshall's Law）。以高精度、广覆盖的英国城市就业和人口分布为案例，讨论这些理论和定律在城市中的应用，反映出一种顺应规律发现的空间智能形式。

Abstract In this research, we define four different sets of relationships that tie together theories and methods that describe and explain how cities and their spatial locations change as they scale. By scaling we mean changes in the size of urban phenomena such as population that take place as cities grow and more generically, how cities change over time. These relationships cover city size distributions and the rank size rule, urban density functions that relate to how dense populations are with respect to their location around the central area of cities, how gravitational interactions between locations scale with respect to distance, and finally how attributes relating to size in cities such as income scale allometrically as cities change in size. These four relationships can be associated with those who first popularised their form, which in the order we introduce them, are what we call Zipf's Law, Clark's Law, Tobler's Law, and Marshall's Law. Having described their form, we illustrate their application to the distribution of employment and populations for small areas and for whole cities in the UK, reflecting a form of spatial intelligence for planning informed by the principles of urban scaling.

关 键 词 标度律；异速增长；规模；人口；就业

Key words scaling; allometry; size; population; employment

文章编号 1673-8985（2025）02-0001-06　中图分类号 TU981　文献标志码 A　　DOI 10.11982/j.supr.20250201

作者简介

迈克•巴蒂

英国伦敦大学学院高级空间分析中心

主席，教授，博士生导师

英国皇家科学院院士，中国科学院外籍院士

m.batty@ucl.ac.uk

沈　尧

同济大学建筑与城市规划学院

同济大学中英联合城市科学实验室

副教授，博士生导师

胡玶妍（译）

同济大学建筑与城市规划学院

硕士研究生

0　引言

100年前，格式塔心理学家们在研究生物系统演化时提出一个核心命题“整体大于部分之和”。这一思想一般归功于库尔特•考夫卡[1]，但其理论渊源可追溯更远至亚里士多德（Aristotle），后者使用协同（synergy）来解释事物是如何通过局部协同而涌现的。这一“少中蕴多”的核心观点揭示出一种现象，即一个系统的演化所引发的质变，通常可以通过其形状或者形态的变化而体现。现实中众所周知的一个例证便是人类的生长过程：新生儿的头部相较于身体整体的质量占比远高于成年人，而随着青春期的结束，身体各部分的比例逐渐趋于稳定。因此，个体的成熟很大程度上反映在其体量的变化上。这种异速生长的模式甚至可以在任何物体的生长过程中得以发现，并且都涉及一项关键属性指标，即规模（scale）。当一个物体的体量发生变化时，我们可以将其定义为“规模变化”。这一过程中，若因该物体的要素组织方式和相互作用而引发质变，则此现象可称作“标度效应”（scaling）。一般而言，规模强调系统的大小或层级变化，而标度强调

*基金项目：阿兰图灵研究院RUBICON项目（ELAT2/100002）；QUANT项目（EP/W006022/1）；国家自然科学基金面上项目“高频城市的网络韧性提升：精细化测度、关键要素识别与自适应优化研究”（编号52278074）；中央高校基本科研业务费专项资金项目（编号22120240370）资助。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

系统的要素比例关系变化。标度效应是本文讨论的关键概念。

体现标度效应的一个最简单的形式（实际是一种十分特殊的形式）是一个物体按一种线性比例增大或缩小，即其体量变化与质量、体积或某种几何度量成正比关系。若以此正比关系为基准，当体量增长超过这一比例时，称为“超线性关系”(super linear)；当增长低于该比例时，则称为“亚线性关系”(sub linear)。在生物学中，超线性关系通常被称为“正异速生长”(positive allometry)，亚线性关系则称为“负异速生长”(negative allometry)。在经济学中，这两种关系可直接对应于规模经济可能带来的经济性与非经济性（economies and diseconomies of agglomeration），被进一步定义为由于增长带来的正、负效应，具有不同的建模方法和现象解释[2]363-371。尽管规模变化通常与增长过程紧密关联，但在空间系统中的标度效应通常定义为特定时刻涌现的空间格局呈现出正异速或负异速特征，而非如其他系统通过动态增长过程来定义。一个系统可以自上而下地定义为一种层级结构，由不同层级的系统形成，体现出一种既定的标度效应；也可以自下而上地定义为一系列从底层涌现的不断增大的多系统组合，具有自发的标度效应。据此，标度效应的涌现与复杂科学的基本原理完全一致。在复杂系统中，其构成要素往往具有一些特定模式，并在更大的尺度上重复出现，形成一种分形结构，体现为非线性的标度效应。本文将通过数学术语和形式定义几何标度效应和相关实证研究解释，相关成果也可用于更加深入地理解城市中不同形态呈现出的不同标度效应与解释[3-4]。

1 基本标度关系构建

标度关系的本质在于揭示物体、现象或系统规模与其序位之间的关联，此处“序位”指的是物体间的相对排序。最简单的序位排列方式是根据物体的某一属性（如规模或尺度）进行排序，并分析该规模分布的统计特征。给定一个包含n个物体的集合，其中每个物体依次记为P_r，r=1，2，3，…，n。理解这些物体所构成的系统中的标度影响最直接的方式就是将物体规模与其逆序位（reverse rank）相关联。这是一种简明的线性关系——物体规模（P_r）与其逆序位（n-r-1）成正比，即$P_r \propto n\text{-}r\text{-}1$。但这里的关系并不呈现标度特征，因为物体规模与其逆序位值完全一致。虽然这种关系在形式上看似无意义，但若根据物体规模再次进行数据重排，即可推导出如下的非线性标度关系，可用公式（1）描述。

$$P_r = Kr^{-1} \tag{1}$$

式中：K是一个常数，用来表示一种固定的非线性标度关系。该式即为经典的位序—规模关系（rank-size relation），反映了物体集合$\{P_r\}$的频率分布特征，该规律现被称为“位序—规模法则”或齐普夫定律（Zipf's Law）[5]。为验证该关系具有标度不变性特征，对公式（1）中的位序变量r引入标度参数λ进行变换（即$(\lambda r)^{-1}$），经数学推导可得公式（2）。该公式说明，随着位序放大1倍，例如取λ=2，对应物体的规模将减半，这种随着位序变化形成的规模非线性缩放特征表明存在一种稳定的标度效应。

$$\lambda^{-1}P_r = K(\lambda r)^{-1} = K\lambda^{-1}r^{-1} \propto P_r \tag{2}$$

上述位序规模关系已被广泛应用于研究竞争性增长系统中要素属性和其相对要素频率（如相对个数）的组成特征，例如城市规模、收入分配、词汇使用频率等现象，并在各类自然或物理现象中不断被发现，如动植物分布、地震、火山活动的分布与频率等现象。在城市研究领域，齐普夫开创性地验证了城市规模分布遵循如公式（1）所示的简单的位序—规模标度关系。然而，后续研究发现城市规模的实际分布更符合幂律形式（P_r=$Kr^{-\alpha}$），其中标度指数α通常偏离理论值1。最近的研究则进一步表明城市规模分布可能更接近于对数正态分布。这种负幂指数特征可能仅体现在整体分布的局部，如上尾端（upper tail），即最大规模个体的分布区间。

本文引入的第2种标度效应表达形式，在某种意义上与位序—规模法则形成互补关系。在这种标度效应中，位序不再基于事物从大到小的规模属性排列，而是取决于各事物与某个原点或源点之间的距离，即某种能够反映排序特征的其他外部要素。这种方法是使用多种参照物给一个物体赋值的经典方法。以城市人口密度分布为例，城市人口密度随距中心商务区（CBD）距离增加而变化，即克拉克定律（Clark's Law）[6]所描述的现象。克拉克与许多研究者都认为，人口密度、租金等会随着与大都市CBD距离的增加而呈负指数关系递减。如果用P_j表示位置j处的人口密度，用d_j，j=1，2，3，…，n表示该位置与CBD的距离，那么克拉克提出的关系式可以表示为公式（3）所示的负指数公式。

$$P_j = K\exp(-\beta d_j) \tag{3}$$

式中：K为与前述相同的量纲常数，β为标度参数。实际上，在许多实证研究中，这类模型往往采用反幂律关系替代负指数形式。因此，作为位序—规模法则（rank-size rule）的空间对应形式，可以将其定义为“位序—距离法则”(rank-distance rule)，其数学表达式如公式（4）。需要注意的是，公式（1）与公式（4）的核心区别在于：前者中的人口规模按规模大小排序（$P_1 \cdots P_k \cdots P_n$），而后者中的规模属性则按距CBD的距离排序（$d_1 \cdots d_j \cdots d_n$）。

$$P_j = Kd_j^{-\beta} \tag{4}$$

本文引入的第3种标度效应函数同样基于空间位置和距离概念，但其侧重于揭示任意两个区位之间的空间交互作用及活动流量特征。与克拉克定律定义人口密度随距离从CBD这一核心区位向外衰减的方式相同，任意两个区位i与j之间的相互作用量T_{ij}同样可表示为它们之间空间距离d_{ij}的函数关系。该关系可通过空间相互作用模型中的经典引力函数表示为公式（5）。

$$T_{ij} = KP_iP_jd_{ij}^{-\gamma} \tag{5}$$

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

在这个函数中，K和γ为需要调参的关键参数。作用于距离d_{ij}的标度效应建模方式与前述齐普夫定律和克拉克定律中相关标度形式一致。公式（5）反映了空间相互作用T_{ij}随距离d_{ij}增加而衰减的特性，这一规律被称作托布勒定律（Tobler's Law）[7]，源自托布勒的经典论述“万物皆相关，然近者关联愈密”。既往研究中，公式（5）的衍生形式多种多样，主要差异体现在其衍生模型均可通过对规模变量和距离变量进行参数化处理，进一步导致它们实际反映了不同的标度规律。若将区位变量P_i和P_j按其标度特性分别定义为P_i^{α}和P_i^{β}，并将它们重新代入以扩展引力模型，则公式（5）可转化为公式（6）。

$$\tilde{T}_{ij} = KP_i^{\alpha}P_i^{\beta}d_{ij}^{-\gamma} \tag{6}$$

通过对区位变量进行幂函数变换体现其标度效应，实际反映了规模经济的经济性或不经济性。如果继续用系数a和b标度区位变量，用λ标度距离变量，则可直接证明公式（6）中的相互作用强度$\widetilde{T}_{ij}$是由一组更复杂的标度函数构成，其整体标度因子仍为常数，可写作$a^{\alpha}b^{\beta}\lambda^{-\gamma}$。

由此本文引出第4类标度关系定义。在这类关系中，系统的物理增长特征表现得更为显著。如前文所述在许多现象中，研究对象规模发生变化会导致不同类型的线性增长。在一些系统中，一些研究要素通过强大的动力学机制带来规模的超比例增长，进而体现为超线性发展；另一些研究要素增长幅度则可能低于规模增长，进而表现出亚线性特征。这种增长模式的差异最早由经济学家阿尔弗雷德•马歇尔（Alfred Marshall）[8]在19世纪末提出并将其定义为聚集效应：超线性增长对应规模经济，次线性增长则对应规模不经济。虽然各类经济模型均对标度关系有所涉及，但在城市等空间系统中，标度关系的形式往往极为简明。相关的最佳例证是韦斯特[2]355-359及其团队针对不同规模城市与城市总收入变化关系的研究。此类标度效应的规律被称为马歇尔定律（Marshall's Law），以纪念马歇尔在其著作《经济学原理》中对规模经济效应的开创性论述。

若将一座城市或一个区位i的人均收入定义为Y_i，并假设其驱动因素为人口规模P_i，那么，城市人均收入与人口总量的标度关系可以用公式（7）这一最简形式表达[9]7301-7306。这一形式在过去十几年被广泛地应用于相关研究中。

$$Y_i = KP_i^{\varphi} \tag{7}$$

式中：参数K和φ的作用机制与前述其他标度关系一致。该式即所谓异速生长函数（allometric equation）的标准形式，虽近期城市标度研究多采用此式，但关于其是否是二者表述效应测度的最佳形式尚缺乏共识。一种新的形式表示如公式（8）所示。

$$Y_i/P_i = KP_i^{\varphi-1} \tag{8}$$

不难发现，无论采用公式（7）或公式（8），参数K和φ的取值均保持不变，但两个公式对于实际观测数据的拟合优度则存在显著差异。相较于此前3个标度效应形式主要聚焦几何、空间和位置等要素，此处的异速生长模型实际引入了社会经济系统运行中的复杂标度效应。本文不直接从概念或数学形式上讨论此议题，但将通过实证分析进一步讨论上述各类标度关系的差异。

2 英国城市系统与城市群系统的标度关系实证

前文所述的4类标度关系具有普适性，可应用于多种系统类型。尽管本研究聚焦于城市与区域，但这些理论框架并不局限于空间系统本身。例如：位序规模关系广泛适用于企业规模分布、收入分配甚至是大语言模型；城市密度函数可用于模拟任何具有源点辐射衰减特征的系统（如污染物扩散）；引力模型则不仅解释城市内部人际交互，也适用于对信息流动、人口迁移、能源传输及交通出行分析；异速生长关系既存在于生物形态学，也体现在构成宏观环境的各类经济与基础设施要素中。

本文把这些标度关系应用于英国城市系统，以中观尺度人口普查单元MSOAs（Middle-layer Super Output Areas）作为基本统计单元，将英格兰、苏格兰和威尔士划分为共8 436个地理单元，每个单元平均人口7 791人，平均就业人数2 378人。这些研究单元远小于英国63个人口超11万的城市（2023年数据），能有效验证规模依赖型分布规律的存在。英国作为高度城市化的岛国经济体，其社会经济分布具备一定的一致性，使得工业城市和城市区域间具备共同性。本文主要采用2011年人口普查中的“工作地就业总人数”定义“人口”指标，相比传统的常住人口统计，该定义更能反映经典城市结构特征。

本研究基于8 436个MSOAs构建标度关系，按就业规模从高到低排序——最高值为伦敦金融城（面积约1平方英里，即约2.6 km²）的325 874个就业岗位，而最少就业规模的地区仅有14个就业岗位。采用“就业密度”作为指标，通过假设就业集中于点状区位，使分析单元（就业区或城市）成为无量纲量具备可比性（即经过面积标准化处理）。一般而言，既有的位序—规模分析（如人口分布研究）通常以国家为研究对象，而将其中的城市按几何特征和密度阈值进行界定。本研究则聚焦城市内部的各个地区并非传统定义中的城市，因为城市不同地区间仍存在为获取各种资源而形成的竞争关系，如何定义城市物理、社会经济边界目前还存在争议[10]。

本文的第一个实证是试图检验位序规模关系。研究使用按就业密度（从高到低）排序的MSOAs数据（r=1，2，3，…，8 436）拟合上文提到的位序—规模公式$P_r=Kr^{-\alpha}$。图1a和1b分别展示了反幂律方程$P_r=Kr^{-\alpha}$及其对数转换形式$\log P_r=\log K-\alpha\log r$的拟合结果。图1a中反幂律公式对观测就业密度的拟合效果较好（R^2=0.844）。在如此精细化的尺度上得到较好拟合结果的位序—规模分析并不多见。在图1b中，图形右侧的长尾明显扭曲了位序—规模的线性关系，而左侧的重尾进一步降低了回归斜率。若从秩次r=1 000处截断大部分长尾数据，所得斜率R^2=0.935更符合齐普夫定律的预期。这说明在不同空间尺度下的分布形

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

态均呈现位序—规模特征。随着对尾部数据的逐步修剪以提升线性拟合优度，该标度关系适用的系统特征也随之改变。这在一定程度上表明，此类估计未必能有效捕捉位序—规模的动态机制，仅能证明有限资源的城市系统导致的均衡状态可用齐普夫定律描述。图1b采用了经过归一化处理的纯位序—规模法则曲线以确保函数截距对应最大就业密度。图中所示的直线拟合为公式$\log P_r=\log P_1-\log r$，清晰揭示了尾部数据的问题。

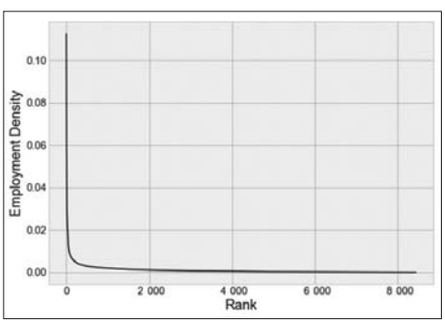
虽然第一标度定律基于经典反幂律关系，但对于就业等经济活动及其密度的空间分布，存在多种定义标度关系的方式。不同于传统位序—规模方法（按活动规模从大到小等距排序为r=1，r=2，r=3，…），本研究使用相对空间位置进行排序，以伦敦市中心（查令十字车站位置）为坐标原点。据此，查令十字车站所在的片区距离市中心的初始距离为d_1=0.5 miles（约1.6 km，该MSOA的平均半径），依次对8 436个区位按距中心的距离升序排列（$d_1 \leqslant d_2 \leqslant d_3 \cdots$）；并同步排序对应区位的经济活动量（$E_1 \leqslant E_2 \leqslant E_3 \cdots$）。传统位序—规模法按经济活动规模降序排列，而本研究中转为按照距市中心的空间距离进行排序，位序由距离定义并投影在体现标度效应的散点图的横坐标轴上。此分析将重点放在系统的形态上，对同一就业密度分布的数据提出一种“位序—距离”视角的分析。

图1c展示了就业密度E_j与位序距离d_j相互关系的散点图，反映了空间特征影响下的标度效应。图1a和1b所示的就业密度位序—规模关系则无法反映地区间区位差异带来的影响。采用位序距离排序后，英国城市体系以伦敦为核心的空间层级结构得以清晰显现，伦敦作为英国城市系统的原点显示出极高的密度值，伯明翰距伦敦240 km是第2个高就业密度区域，曼彻斯特距伦敦300 km，而后依次为西约克郡、纽卡斯尔，距伦敦约550 km的格拉斯哥—爱丁堡都市区构成了最外围的主要就业集聚区。图1d展示了位序距离关系的对数变换的结果，即$\log P_j=\log K-\alpha\log d_j$，这种变换会一定程度上掩盖形态特征。如图1d所示，距伦敦越远，就业密度的地区间差异越大，就业密度也急剧下降。若将$\log P_j$对$\log d_j$进行简单线性拟合可得到斜率α=-0.439，表明一种隐含的“位序—规模”关系，但拟合优度很低，只有0.088。

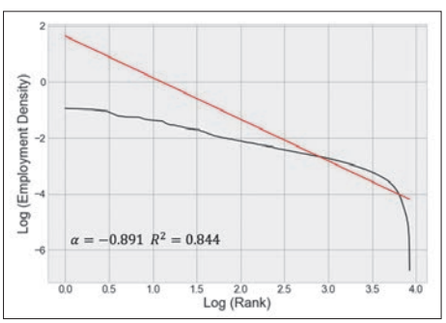
第2种标度关系采用克拉克模型，将密度和离就业、人口等活动的距离相关联。虽然上文已定义了就业布局与距伦敦市中心的距离的标度关系，但为了更好地说明城市密度的标度特征，本研究再次调整了距离的计算方法以反映不同空间建模和统计方式带来的影响。仍以查令十字车站为中心，由其开始每1 km划分同心环带。在每个环形带中，所有MSOAs的就业人数加和并赋值给该环带，再除以环带的总面积而得到每个环带中的就业密度。研究仍从中心依次向外计算直至最外围环带距伦敦约1 018 km处，覆盖最后一个空间单元（第8 436个MSOA）。环带密度计算法有效平滑了环带内的密度波动，从而呈现出更清晰的英国全域密度梯度分布模式（见图2）。这一结果是对图1c与图1d中所示的位序—距离分布的补充性研究。图2所示的一些环带在距离中心超过400 km后因为无就业数据也几乎无法制图，因此图示结果并未纳入超过400 km外的部分城市区域，涉及部分苏格兰地区。这些地区距离中心十分远且数量较少，对于整体标度规律发现影响甚微。

图2表明基于公式 $P_j = Kd_j^{-\alpha}$ 的就业密度分布，显示出明显的反幂律标度特征。在前50个环带（50 km范围内）密度急剧下降。为检验这一关系在距伦敦400 km范围内的稳定性，研究采用了其对数转换形式$\log P_j=\log K-\alpha\log d_j$。图2b描绘了在距中心（查令十字车站）约30 km范围内，就业密度分布符合克拉克定律（R^2=0.958），此后虽然密度变异增大，但整体拟合效果仍旧良好。拟合的直线函数中斜率为β=-0.72，解释方差降至约0.379。由于环带模型约束了连续空间形态，这一研究结果可视为与上文基于克拉克定律与齐普夫定律的位序—距离关系的一种空间连续约束下的等效形式。

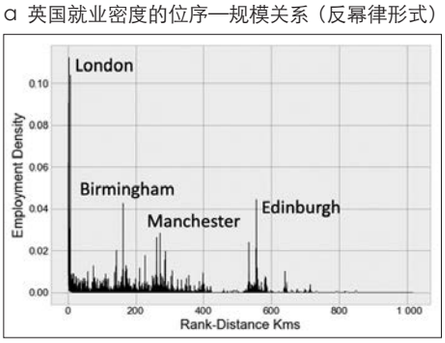
第3种标度关系涉及区位间相互作用模



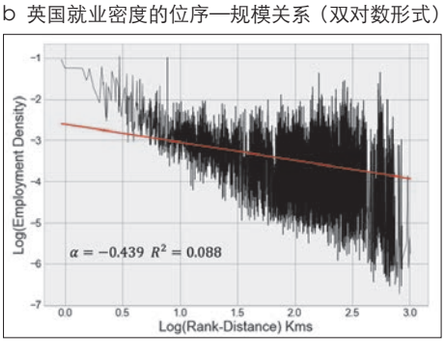
a 英国就业密度的位序—规模关系（反幂律形式）



b 英国就业密度的位序—规模关系（双对数形式）



c 英国就业密度的距离位序—规模关系



d 英国就业密度的距离位序—规模关系（双对数形式）

图1 经典的标度关系
Fig.1 Classic scaling relationships

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.

式的量化分析，其核心在于探究始发地、目的地之间的活动流与空间阻抗的标度关联。空间相互作用的模型有诸多形式，较为复杂很难一言蔽之，但其涉及的本质标度关系与公式（5）的表达十分接近。基于英国本土城市系统的数据与实证研究，本研究开发了一个测度空间相互作用的基础模型，用负指数函数替代传统反幂律来模拟始发地—目的地间的通勤流所涉及的特殊标度机制。该模型如公式（9）所示。

$$T_{ij} = E_i P_j \exp(-\gamma d_{ij}) \Big/ \sum_j P_j \exp(-\gamma d_{ij}) \quad (9)$$

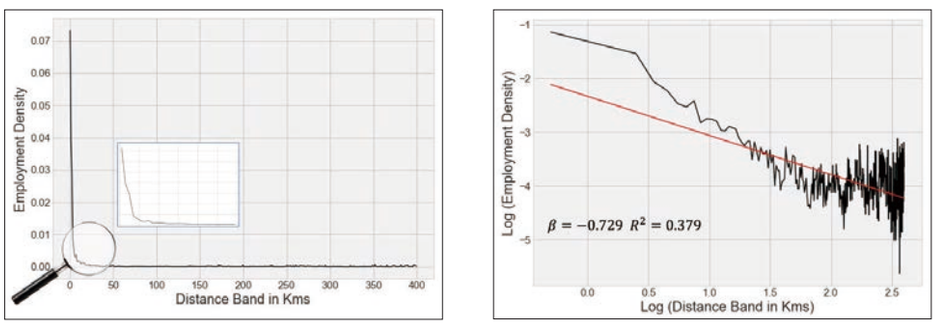
式中：γ为标度参数，E_i为始发地i的就业规模，P_j为目的地j的就业规模。在实际建模中，进一步按交通方式分别估计标度效应。即使用公式（9）分别拟合私家车、公交和铁路3种出行模式。研究得到3种交通方式对应的参数估计值分别为0.131、0.072和0.064。通过聚合所有交通方式的出行流，可计算任意区位至其他区位的平均流量，并绘制如图3所示的可视化向量[11]。该图谱虽仍只是示意性的，但清晰揭示了英国城市流量分布的标度特征，为理解城市系统流动的分形结构提供了重要视角。

3 城市异速生长与标度关系

本研究提出的第4类，也是最后一类标度关系，将关联模式从负向（反比）转为正向关系，其核心在于探究关联变量属性随规模变化的规律。异速生长理论指出城市规模扩张会引发质的改变。在城市系统中不同变量虽然变化速率看似不同，却可能实际上具备稳定的联系并导致系统质变，这是异速生长理论的核心。在之前的案例中，并未涉及就业和人口分布的空间分析单元的一致性问题。这是因为位序—规模标度关系的研究一般基于某一项单一属性的分布特征而非多要素的相互标度关系，因此，通常假设研究对象是组成某一系统的连续要素，例如将整个英国城市系统细分为8 436个MSOAs，只研究就业岗位密度，正适用于此场景。然而，当我们试图比较反映城市规模的多种属性指标的相互关系时，则需要保证研究对象单元具备一定的独立性，以确保能够较好地分析指标之间的关联。为分析多要素异速增长的现象，本研究使用英国城市研究中心（Centre for Cities，CfC）2023年63个人口超过11万的英国城市为分析单元[12]，以保证分析单元边界清晰、要素可比。

异速生长的概念可以在公式（7）中体现。以城市为例，城市的属性Y_i与城市规模P_i^{φ}呈正向标度关系。参数φ为正值：当$0<\varphi<1$时，属性随城市规模呈次线性增长（增速递减）；当$\varphi>1$，则呈超线性增长（增速递增）。这两种趋势分别说明城市发展可能呈现出不同的规模经济效应，可能是积极的经济效应，也可能是消极的不经济效应。该关系由马歇尔首次提出，经Bettencourt等[9]7301-7306系统发展，构成了本文相关讨论的理论基础。图4a所示的是CfC数据库中每周总薪资与人口的标度关系，令人吃惊的是二者之间几乎不存在任何标度关系。双对数散点图的拟合结果中斜率φ=1，意味着随着城市人口的增加人均工资几乎没有任何变化。与此同时，伦敦呈现出明显的离群特征，其工资水平显著高于数据集中的其他所有城市。

在过去100年间关于城市规模效应的经验理论认为随着城市规模扩张，其规模经济效益将超越规模不经济效应。这一论断的核心假设在于人际交互增强，经济规模将与人口成正幂次（P_i^{α}，$\alpha>1$）比例增加。尽管存在交通拥堵和专业设施获取难度增加等非经济因素，但一般不会抵消经济效益。城市规模效应的测度



a 反幂律分布　　b 双对数关系

图2 英国城市就业密度与距离带位序的标度关系

Fig.2 Urban density profiles for London

资料来源：笔者自绘。

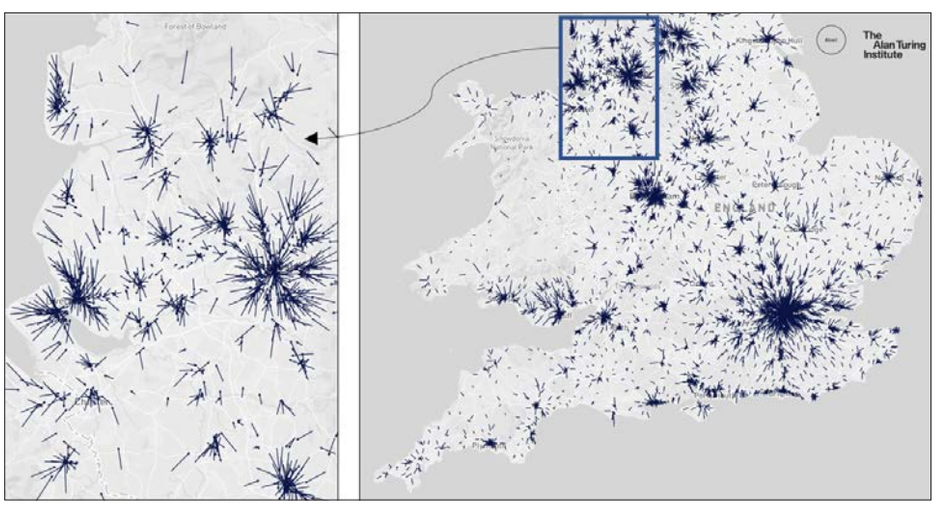
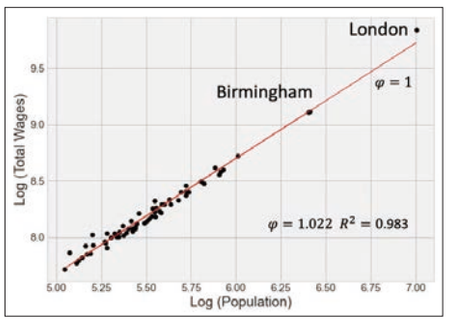


图3 空间相互作用强度与城市规模之间的标度关系

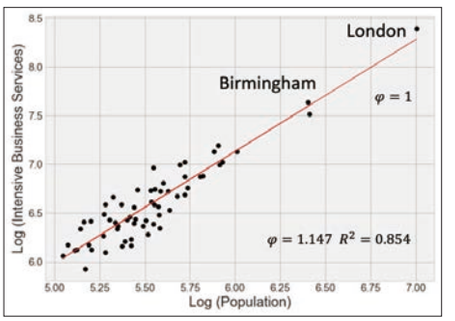
Fig.3 Spatial interactions patterns that scale over city size

资料来源：笔者自绘。

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.



a 线性标度关系



b 超线性标度关系

图4 英国63个大城市的线性与超线性标度关系

Fig.4 Linear and super linear scaling for the biggest 63 cities in the UK

资料来源:笔者自绘。

与规模经济的指标设定有关,既往研究中发现与城市规模呈正幂次关系的指标包括:服务业相对增长、技术创新指标(如专利获取量)、知识基础积累程度,以及提升全球城市可达性的网络设施集聚度等。本研究在CfC数据库中发现,高度集聚于大城市的密集型商业服务业密度与城市人口存在超线性标度关系(见图4b)。但通过CfC数据,本文仅验证了少数英国最大城市具备该类特征,与全球其他地区的相关研究[13]相比,这一正向超线性标度效应在英国的表现明显较弱,表明不同城市系统中可能存在同一标度特征的明显差异。

4 城市标度理论的进展与走向

作为一种空间智能的规律表示,城市标度理论、方法和实证研究都面临多种挑战。这些议题首先受限于如何定义分析的单元用以解释属性呈现出的标度特征[10]。在全球化、城市化日益加深的当下,城市间在空间上越发连绵,国际移民不断涌入全球城市,使得城市边界越发难以界定。从第一产业到第四产业(一般性信息技术服务业,以通信、互联网等技术为基础),乃至快速发展的第五产业(高度专业化信息服务业),其经济活动往往跨城市、跨国界分布,导致许多当代经济行为难以锚定于明确区位。

另一个尚未被充分研究的议题是城市规模标度效应的时变现象。虽然聚集经济理论中隐含着对于城市标度效应随着城市发展而变化的解释,但既往对于城市系统的研究仍通常聚焦于处于均衡状态下的城市。对于非均衡态的城市标度效应的研究仍旧较少。例如,如何进一步建模和解释异速生长效应参数随着聚集经济的发展与城市规模的扩张的相关关系发生从低向高的转变。因此,构建动态城市标度效应的理论、方法和实证是构建更加完善的标度理论必须攻克的挑战。

我们亟需一套能够整合各类标度关系的理论体系。该理论体系应该根植于城市系统的几何特征和形态分布。这一思想最早由Berry[14]提出,但过去数十年来鲜有后续研究。正如Berry所言,该理论体系应与隐含几何属性的空间经济理论深度融合,并涵盖多种区位理论与城市经济运行机制理论。更重要的是,这种理论体系的建构都应充分考虑当前的全球化背景,因为本文所涉及的各种标度效应也许也正处于持续演变之中。本文正是构建这样的理论体系的一个初步尝试,它的目标是通过标度效应的研究来增进我们对当前和未来城市系统的理解并构建方法论体系,为规划与设计更具可持续性与韧性的城市提供科学依据。

参考文献 References

[1] KOFFKA K. The principles of gestalt psychology[M]. London: Routledge and Kegan Paul, 1935.

[2] WEST G. Scale: the universal laws of life and death in organisms, cities and companies[M]. London: Weidenfeld and Nicolson, 2017.

[3] BATTY M. Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals[M]. Cambridge MA: The MIT Press, 2005.

[4] BATTY M, LONGLEY P A. Fractal cities: a geometry of form and function[M]. London and San Diego: Academic Press, 1994.

[5] ZIPF G K. Human behavior and the principle of least effort[M]. Cambridge MA: Addison-Wesley, 1949.

[6] CLARK C. Urban population densities[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General), 1951, 114: 490-496.

[7] TOBLER W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. Economic Geography, 1970, 46(s): 234-240.

[8] MARSHALL A. Principles of economics[M]. London: MacMillan Company, 1890.

[9] BETTENCOURT L M A, 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.

[10] ARCAUTE E, MOLINERO C, HATNA E, et al. Cities and regions in Britain through hierarchical percolation[J]. Royal Society Open Science, 2016, 3(4): 150691.

[11] BATTY M, MILTON R. A new framework for very large-scale urban modelling[J]. Urban Studies, 2021, 58(15): 3071-3094.

[12] Centre for Cities. CfC cities data tool[EB/OL]. [2025-03-29]. https://www.centreforcities.org/data-tool/#graph=map&city=show-all.

[13] BETTENCOURT L M. Introduction to urban science: evidence and theory of cities as complex systems[M]. Cambridge: The MIT Press, 2021.

[14] BERRY B J L. Cities as systems within systems of cities[J]. Papers of the Regional Science Association, 1964, 13: 146-163.

《上海城市规划》https://www.shplanning.com.cn/. All rights reserved.