

动态的空间句法 —— 面向高频城市的组构分析框架

Dynamic Space Syntax: Towards the Configurational Analysis of the High Frequency Cities

沈尧
Shen Yao

摘要：当今的数字社会发展促使我们开始关注更加高频的城市现象，并可以寻找这些现象的空间逻辑以提高未来规划设计的动态效应。空间句法是城市设计过程中一种对于城市空间结构的认知方法，在过去20年被广泛应用于西方城市设计的研究与实践，并积累了丰富的研究成果。然而，作为一种经典的描述性模型，传统的空间句法模型很难应对规划设计实践中面临的动态性社会问题。本研究提出了一种在新的数据条件下研究城市空间组构动态效应的方法框架。通过将轨迹数据与传统组构分析的方法框架相结合，提出新的组构中心性概念——时空共现强度，并介绍了相关的指标来量化人们时空行为在不同时段的几何属性及其模式，以探索动态的城市组构分析理论与方法。本文所提出的动态的空间句法框架暗示着从一种静态的、只关注物理空间的城市组构研究向一种动态的、更关注人的行为空间的城市组构研究转变的趋势，揭示了充分利用当前数据环境并将城市设计作为一种动态城市空间功能性提升的有效手段在未来城市设计中的积极意义。

Abstract: Urban digitalisation is currently drawing extensive attention on the socioeconomic performance in the high-frequency cities and its spatial logics for improving the spatiotemporal effectiveness of spatial interventions that are proposed. In the past decades, configurational analysis provided an ideology/methodology of decoding urban form and its relation to various functionality, which has been widely adopted in the urban studies and planning and design practice in the West. As a mainstream of configurational studies, space syntax delivered a novel way to model the spatial configuration and demonstrated a series of robust relationships between spatial centralities and urban performance. However, as a descriptive model, traditional space syntax model can hardly be used in planning and design processes to address temporal social issues that are emerging temporally. Based on space syntax model, this paper introduces a new method to quantify the spatiotemporal centralities of the spatial configuration, which is sensed via the urban flow data. The delivered method is called co-presence intensity, a dynamic concept in space syntax, to measure various geometric centralities and the emergent modes of humans' trajectories constrained by the spatial configuration. The findings in this paper demonstrate a trend to a dynamic, temporal, flow-focused configurational research from a static, aggregated, form-focused space syntax analysis. This work also implies that urban design, empowered by the proposed configurational analysis technology, can be considered as a social instrument for improving urban spatial functionality during a much short time period than before. This article ends with a discussion about how space syntax could be reconstructed in the new digital society facilitated by the new data environment.

关键词：时空动态；空间句法；行动轨迹；共现强度；机动性；高频城市

Keywords: Spatiotemporality; Space Syntax; Trajectories; Co-presence; Mobility;
High-frequency City

作者：沈尧，同济大学建筑与城市规划学院城市规划系，伦敦大学学院巴特雷特高等空间分析中心。eshenyao@tongji.edu.cn

1 背景

随着信息通信以及数字技术的发展，我们赖以生活的城市以及其承载的内容正在越发高速地运转和传递，社会生活的内容和频率随之丰富和提高，我们观察城市活动的方式也因此而不断地发生变化^[1-3]。在新的数据环境下，各种大规模、高精度的时空数据不断涌现，我们分析和解读城市建成环境的视角也在重构：从一种整体性的低频视角转向一种富含丰富异质性信息的高频视角。事实上，所谓的高频视角不仅是一种新视角，更是一种更真实的视角，一种更接近人日常生活频率的视角，可以从一分、一秒推至一日、一周、一月等较大周期。我们传统的审视城市的视角则通常是一种低频视角，也许是一年、十年甚至是若干世纪等长周期^[4]。因此在某种程度上，理解高频城市背景下的城市运行机制才是以人为本地理解真实城市的一种基本视角，它作为现实城市的一种“数字孪生”的镜像，将充分补足我们传统的基于低频城市的认识^[5]。

城市组构研究（configurational research）的发展构建了一系列认识、度量与分析城市建成空间形态的理论与技术方法，其中最具有代表性的便是空间句法研究——它已经成为新城市科学的重要部分^[6]。空间句法的一个核心观点是：空间组构即为现实社会的“物质”镜像，其催生同时限制着各种社会经济联系的形成与重塑。支持这一论断的一项重

要实证基础是存在于空间中心性与整体人流极差分布之间的稳健关系^[7,8]。在现实中人们不断通过感知可见的人流的分布来解读物质空间的中心性,进而在其影响下参与社会经济活动中的各项选择,并最终影响了涌现的整体趋势^[9,10]。因此,空间句法通常能够快速地在低频城市背景下的物质空间结构与社会经济表现的整体布局之间的关系,进而指导相关空间干预策略的调整。

当前不断涌现的城市社会经济数据和算法已使我们观察高频城市成为可能。理解城市空间结构对于高频的社会经济活动的动态影响,也因此成为面向未来的城市规划与设计实践的一种需求,同时是新城市科学发展的一项重要任务。由于缺乏有效的测度手段和理论支持,传统的空间句法对于社会经济活动的变化之中所暗含的空间逻辑的测度一直受到很大限制。因此,本文将重点研究如何构建一种动态的空间句法模型来度量城市组构的动态结构属性,并解释相关方法的理论基础,以发展一种高频城市视角下的城市空间组构分析的基本框架。对于组构动态结构属性的研究将有助于我们更高效、精准、以人为本地规划与设计我们的城市。下文将首先回顾空间句法理论当前发展的困境与面临的挑战,进而提出一种将传统空间句法理论与新的数据以及技术相结合的方式。本文最后讨论了所提出的动态空间句法框架将如何影响空间句法理论进一步发展成为新的城市科学中的重要部分,并对未来的城市设计有所贡献。

2 高频城市背景下的城市组构研究困境

2.1 出行的经济:空间句法的理论基础与组构效应测度

空间句法模型是一种典型的城市组构研究模型,其关注的核心议题是空间如何相互关联起来构成了可见的形态,并影响人们对其的使用进而彰显城市形态的社会经济内涵。它的一个理论基础便是如何构建社会空间化与空间社会化这两个进程之间的联系。在空间句法理论中,这二者的联系是通过对于人们自然活动的描述得以建立的。这一理论基础被称作“出行的经济”(movement economy)^[11],它定义了城市空间、功能布局以及自然人流三者的关系,指出城市空间中存在的广泛的中心性会非均匀地影响人们活动的聚集形态,并使社会经济效应的布局在空间系统中得以自显^[12-14]。在空间句法理论体系中,城市空间组构是各种社会活动的背景,它形成了一种“空间资本”来影响和限制人们在城市空间中的各种交往活动。单一个体在城市空间中活动会不自觉地感知到这种空间效率的差异,并使其最终体现在群体性人流的分布中,即自然人流(natural movement)的布局^[15]。空间句法研究因此认为在现实城市的某一时间断面上,人们可以根据空间形态的效率以及可见的人流来做出各种与空间有关

的社会经济决策,进而形成各种相关活动的局部模式。而这些功能布局作为城市引力点又将影响人流的分布,形成城市组构形态效用的间接传递。以空间为参照,功能布局与人们的活动之间形成了一种反馈机制来不断地强化空间形态的倍增效应(multiplier effect)。这一理论模型强调了城市形态对于城市功能布局与人流分布的根本影响,并提供了一种将物质形态与其承载的社会经济活动相关联的路径。

出行经济这一理论提供了一种联系空间形态组构效率、功能布局与人们的出行行为的框架,并试图基于此赋予空间干预方式更多的人本思维。它强调了功能布局与人流形态中蕴含的形态逻辑,同时提供了理解城市中物质空间的知识是如何被转译为人们的现实互动决策这一过程的路径。城市组构体现了对于物质空间系统的句法的信息(syntactic information),为功能布局与人们的活动轨迹提供了不易察觉的秩序参照;功能布局则包含了语义的信息(sematic information),为人们的活动提供了可察觉的内容;人流轨迹则包含了出现的信息(present information),反映人们的社交互动状态。这一转译的过程实际上也表征了相对静态的空间形态如何影响相对动态的人流轨迹。换言之,传统的空间句法提供了一种通过低频城市视角来观察高频城市中城市稳态的途径。这是在过去数据与计算能力缺乏的时代一种优化城市设计的非常有效的途径,因为它构建了一种描述性的理论与方法论,用相对少量的、设计师熟识的、可操作的数据对于动态的城市现状进行了简明的总结以及相对精确的拟合(图1)。

2.2 新数据条件下空间句法理论发展的困境

当前不断涌现的多元、海量、快速更新的城市数据为研究精细的时空尺度下的城市形态对人类活动的影响提供了广阔的研究前景。特别是那些高频时变的城市数据,如签到数据、手机信令数据等,提供了一种接近真实城市运行频率的高频视角。然而这一数据条件的变化也带来了对于城市组构理论发展的新需求,并使得传统的空间句法的理论构建、方法论框架以及实证价值受到了一定程度的挑战。

首先,时空大数据中饱含的关于人流的时空动态信息正在挑战传统空间句法对人流分布描述的实证价值。传统空间句法的一大实证基础便是城市拓扑结构的联系的紧密性与总体自然人流的极差结构之间稳定的相关性,并且在实证中二者之间的关系并不受个体性差异的影响^[16,17]。这也成为空间句法理论的重要论据之一,支撑着它对于循证设计的独特贡献。然而,时空大数据使得我们可以描绘人们行为的细致肖像而直观地获得关于城市人流的分布信息,似乎运用传统空间句法这一描述性模型的紧迫性和必要性正在被挑战。在

这一趋势下，空间句法理论和方法论的发展就需要重新思考如何去应对高频城市中规划设计的新需求，并确立组构分析在新的数据环境下的实证价值。

其次，精细化的时空数据中所蕴含的行为时空差异在传统空间句法中被过度简化并缺乏必要的与之相关的理论构建。时空数据能够准确揭示人们行为的动态变化，然而在传统空间句法理论中，城市组构一般被认为是影响总体（aggregated）人流形态极差形态的关键，而对于它是如何影响自然人流的瞬时变化的，以及二者之间是否存在稳健的相关性却缺乏有效的研究。这在很大程度上限制了进一步理解受城市形态组构中心性影响的动态性。因此，空间句法在当前面临的第二个困境便是如何在现有理论框架的基础上构建一种新的组构分析方法，从而展现城市形态的变化如何改变人流分布在时间维度的动态性。

再次，时空数据中包含的与行为主体相关的异质化信息在以“自然人”为理论前提的空间句法理论与方法论中暂时缺位。自然人流在空间句法理论中指的是被城市组构影响的人流轨迹分布，其暗含的一个理论假设便是不论人们个体出行的具体原因、起点以及目的地，我们观测到的出行轨迹的总体分布是被人们出行的共性特点所影响的，即他们对空间组构的一致解读^[7]。这个假设其实表明，传统空间句法模型关注的是人们的群体行为而非个体行为，或者说，它关注的是人们的聚集效应而非个体分异。然而当前的时空数据的一个特点就是对个人行为的精准描述使得其包含城市空间使用

者的主体信息。虽然空间句法也曾被用来研究人们的空间分异现象^[18,19]，但没能阐释和度量城市组构对于不同类型公共空间使用者的效用，以反映更深层的城市形态的社会价值。

综上所述，新的数据环境虽然带来了从高频角度认识现实城市的契机并明确地表征了未来城市设计的人本需求，然而我们赖以分析城市形态的理论手段，包括空间句法理论与方法论，似乎还在遵循一种低频的角度。如何借鉴已有的空间句法理论与方法框架，回应这些在新数据条件下传统描述性组构分析所面临的困境，使其具备更加广阔的、面向高频城市的应用前景，成为亟待解决的问题。

3 时空共现强度——面向高频城市的空间句法框架

3.1 城市组构与时空共现

城市空间为人们的社交创造空间条件以及内容^[20]。因此，自然人流在空间句法理论中也被理解为一种共现（co-presence）^[21]，即城市空间的组构联系紧密性实际是人们相遇、对视、交流的难易程度的反映^[22]。当然，在当今社会，由于通信技术与交通技术的发展，共现的形式非常多样，它可以指人们在现实或者虚拟环境中的共存状态^[23]。然而，物质环境中的共现作为虚拟共现的现实锚点仍旧十分重要，并和城市活力以及城市空间的公共性等议题密切相关^[24,25]。

建成环境中的面对面的共现现象与人们的出行密切相关，而后者则受到联系距离衰减效应以及空间引力的影响^[26]。这不仅与交通地理学的许多研究契合，也与上文所述的空间

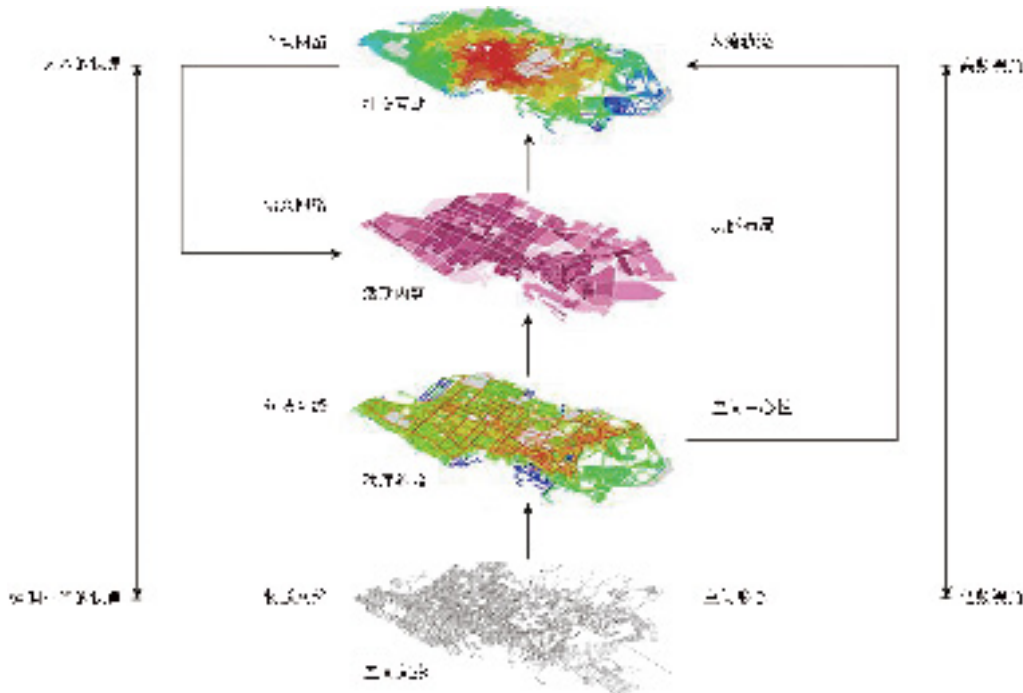


图 1 空间句法中的出行的经济模型及其内涵

句法的论点一致。在空间句法理论中，城市组构的拓扑距离衰减效应被组构的近邻性所反映，空间引力则体现在受到城市组构影响的城市的功能布局形态中。此外，时间维度也是现实环境中共现现象的重要前提，它反映了共现的强度与持续时间^[27]。因此，可以将物理环境中的时空共现现象的决定因素总结为三方面：空间的组构距离、时间距离与行为主体的社会距离。本文将充分整合这三种距离，并基于涌现的时空轨迹数据与城市形态数据测度城市组构的动态中心性结构。

3.2 度量时空共现强度：一种面向高频城市的空间句法中心性

(1) 概念化定义

本文定义了三种距离来表征现实环境中面对面的时空共现潜力，即时间距离 d_t ；空间距离，其中包括物理距离 d_m 与几何拓扑距离 d_g ；以及社会距离 d_s 。从概念的角度，任意两个个体之间的共现潜力可以被定义为 $f(d_t, d_m, d_g, d_s)$ ，并且当这些距离越小，时空共现强度越高。我们可以将一些距离概念进行一些转换，如将时间距离变为共现的时长，即 $D_t \approx \frac{1}{d_t}$ ，或将社会距离具体化为社会定义为社会混合度，即 $D_s \approx \frac{1}{d_s}$ ，那么它们的共现潜力则可被定义为 $f(D_t, D_m, D_g, D_s)$ 。本文将这个关系具体定义为：

$$I_{ij} = \frac{D_t^i D_s^j}{d_g^{ij}}, (d_m^{ij} \leq dm) \quad (1)$$

在式(1)中，表明个体*i*和*j*之间的时空共现潜力 D_t^i ，代表它们之间的共现时间长度 D_s^j ，代表它们之间的社会混合度，表示它们之间的几何拓扑距离，而 d_m^{ij} 则代表它们之间

的地理距离。有三点需要详加说明。首先是 D_g^i 与 D_m^i 的关系，前者是几何拓扑距离，表示两个地点间受城市形态影响的角度距离最小的路径的累积角度步长距离^[28]；后者是路网距离，即两个地点间最短路径的长度。借鉴空间句法模型，本研究用路网距离阈值来限定研究尺度，而将几何拓扑距离作为距离衰减效应的表征，这样的设定可以同时研究两种距离效应的互动，且能突出在地理距离约束下的城市组构效率。这对于时空共现强度的测度有特别意义，因为地理的地点共现（co-location）是面对面现实共现的先决条件，而在此基础上，组构距离则进一步决定了在同一空间中的共现概率。以图2为例，时空棱柱A与B分别代表了用户1与2，用户2与3在时空坐标体系中的共现位置。很显然，虽然他们在地点共现上很接近，但是从城市形态上看则不尽然。用户1与2在街道A的相遇概率很可能会高于用户2与3在街道B的相遇概率，因为用户1与2都出现在街道A上，他们之间的组构距离为1步，而用户2与3则出现在街道B的两条临近街道上，他们之间的组构距离大于1步。这意味着街道A很可能是用户1与2相遇的街道，而街道B则可能是用户2与3相遇的街道。简而言之，物理距离相近的两个个体仍旧需要他们之间的组构拓扑距离尽量小来满足面对面时空共现的可能。

其次，如何定义 D_s^i 。很显然这个定义关乎于我们需要关注什么共现现象，以及如何定义社会距离对于理解城市组构的中心性结构更加有意义。在空间句法理论中，城市的组构中心性被认为对应一种“下意识的对他人的察觉”（unstructured awareness of others）^[22]，而富有活力的公共空间也被认为应该支持培养不自觉的本地人和陌生人之间的熟悉感^[25]。因此，在本研究中 D_s^i 被具体化为“本地人”与“非本地人”的混合程度，用来表征城市形态的社会公共性^[29]。

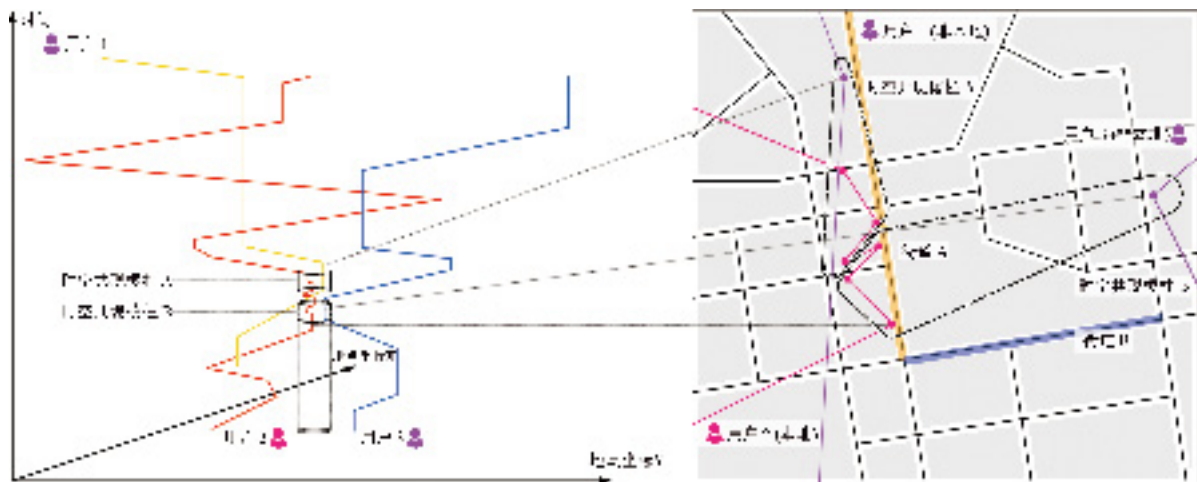


图2 个体间时空共现场景示意（左：时空地理坐标系中的共现图示；右：城市形态影响下的共现图示）

“本地人”与“非本地人”的区分是根据他们的时空路径行为划定的，并且因地点而定义不同。对于某一地点，在其附近长时间内频繁出现的人被定义为本地人，而在该时间段内短暂访问该地点的则被定义为非本地人。这里的本地与非本地人并非一种绝对的地缘定义，而是一种动态的、可以通过相互共现行为来感知的。一个个体频繁地出现在某地，对于随机到访的第三者来说，他就很可能被人认为是“本地人”。对于本地人与非本地人的共现的支持是城市形态组构效能的重要体现，下文将具体介绍其数学定义。

第三，关于 D_i^{ij} 与 D_s^{ij} 的关系的定义。在本文测度受控共现潜力时， D_s^{ij} 被作为 D_i^{ij} 的指数，其作用一方面是强调社会距离对于共现潜力结构的重要影响，另一方面是可以区分二者分别为 0 时 $D_i^{ij} D_s^{ij}$ 的取值。此外，从式 (1) 可以看出， $D_i^{ij} D_s^{ij}$ 表征了人们时空聚集的特点，如果将其设定为均值

($D_i^{ij}=1$)，那么 $I_{ij} = \frac{1}{d_m^{ij}}$ ，($d_m^{ij} \leq d_m$)。事实上，如果假设两个主体 i 和 j 是不同的街道，这一形式就与空间句法中整合度的定义非常接近了。

(2) 度量时空共现强度

时空共现强度 (physical co-presence intensity) 可以被定义为第三者在城市组构中感知到的熟悉与陌生人群在空间中相遇的潜力。基于式 (1) 的概念，某一城市组构基本单元 i 在给定时间段 Δt 内所承载的物理时空共现潜力 $I_i^{\Delta t}$ ，可以被定义为不同人群在该空间单元地点内给定时间范围内时空共现的累积潜力，即：

$$I_i^{\Delta t} = \frac{(\sum_j D_i^{ij \Delta t})^2}{\bar{a}_g^{ij \Delta t}} = \frac{(\sum_j D_i^{ij \Delta t})^2}{\sum_{i,j} D_i^{ij \Delta t}}, (d_m^{ij \Delta t} \leq d_m) \quad (2)$$

在式 (2) 中， $D_i^{ij \Delta t}$ 指个体 j 在地点 i 的出现时间长度； $\bar{a}_g^{ij \Delta t}$ 则指地点 i 附近路网距离 $d_m^{ij \Delta t}$ 小于给定阈值 d_m 所定义的范围内，给定时间段 Δt 内，所有个体出现的地点 $j \in (1, 2, \dots, J)$ 与地点 i 间的组构距离，即几何拓扑步数。 $D_s^{ij \Delta t}$ 则被定义为不同类型人群在地点 i 的共现潜力的混合程度，用信息熵计算，即：

$$D_s^{ij \Delta t} = \frac{\sum_k p_k^{ij \Delta t} \log p_k^{ij \Delta t}}{D_i^{ij \Delta t}}, D_i^{ij \Delta t} = \frac{D_i^{ij \Delta t}}{D_i^{ij \Delta t}} + \epsilon \quad (3)$$

在式 (3) 中， $p_k^{ij \Delta t}$ 指的是第 k 组个体在指定时间段 Δt 内，出现在地点 i 附近的概率 ($k \geq 2$)，由其出现的总时间长度 $D_i^{ij \Delta t}$ 在所有人群出现的总时长中的占比计算得到。

本研究关注的是城市形态的动态中心性，由他人通过共现行为认知中的本地人与非本地人的共同物理时空共现潜

力来表征，由于其描述了城市形态的公共性，即吸引人前来并驻留这两种引力的复合效应，在一定程度上对应自然人流的两方面：到达人流 (to-movement) 与经过人流 (through-movement)，而这两种人流的混合展现了城市空间组构的效率^[30]。本文提出了一种根据人流轨迹来定义本地人与非本地人的方法。具体而言，我们根据任意个体在指定地点 i 范围与时段 Δt 内的出现概率 $\mu_i^{\Delta t}$ 来定义本地人与非本地人，即：

$$\mu_i^{\Delta t} = f_1(F_i^{\Delta t}) f_2(D_i^{\Delta t}) \quad (4)$$

其中 $F_i^{\Delta t}$ 是个体在时段 Δt 在地点 i 出现的频次， $D_i^{\Delta t}$ 是对应的出现时长，而 f_1 与 f_2 分别是将二者转化成概率形式的残存函数。若出现概率大于设定阈值 μ ，即 $\mu_i^{\Delta t} \geq \mu$ ，则被认为是本地人，他们不仅频繁地在某地出现且时长较长，若相反则是非本地人。

(3) 实例

基于上海 2016 年 3—6 月的 286 万余条点状微博签到轨迹数据以及街道网络数据，本文计算了工作日每一小时城市时空共现强度分布。本文检验了样本数据中的出行行为特征，得到的出行行程长度与时长都符合长尾分布的特征，即大量的出行属于短途，少量属于长途 (图 3)，这也符合最近的出行研究中基于类似数据所得的类似结论^[31]。因此，尽管微博签到数据可能存在“厚度”不足以及有偏抽样的潜在风险，我们仍认为该数据在整体上接近真实，可作为描述整体人流轨迹形态的可靠数据。

上海市中心区域的时空共现潜力分布 ($\mu=0.5$, $dm=800 m$, $\Delta t=1h$) 表明，城市组构对于自然人流的汇集及其所带来的社交潜力的影响是随着时间变化的 (图 4)。在全天大部分时段，城市时空共现潜力的极差结构相对稳定，主要的就业中心被暖色区域标示；而在深夜休息时段，城市交通枢纽附近的街道则成为时空共现现象集中出现的场所。凌晨以及上午时段，时空共现潜力分布更加集中，而在下午以及晚间时段则呈现更加清晰的多中心结构。这说明，现实中的人流分布不仅与城市形态有关，也与他们的出行目的和习惯有关。通过将人流轨迹纳入到组构分析中，可以表征组构是如何与其他动态因素共同作用，而使得城市形态对人们聚集的影响呈现明显的一致性与差异性并存的状态。

(4) 时空共现潜力作为一种组构中心性

本节试图进一步验证时空共现潜力是否能够作为组构中心性的一种表达。回答这一问题的核心在于，人们在现实世界的公共空间中的相遇是否有其组构的逻辑。从结果可视化上来看，共现潜力的时空变化是被城市组构所影响的，但这样的共现潜力中心可以随着时间推移在很小范围内

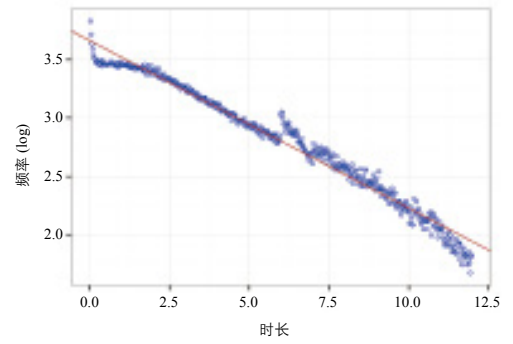
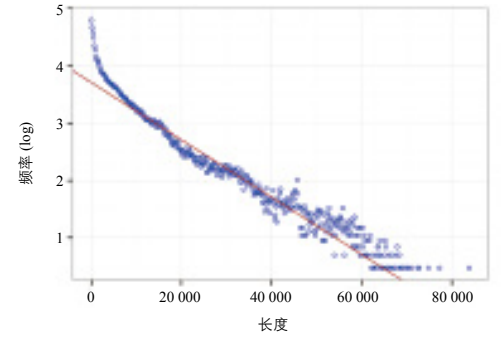
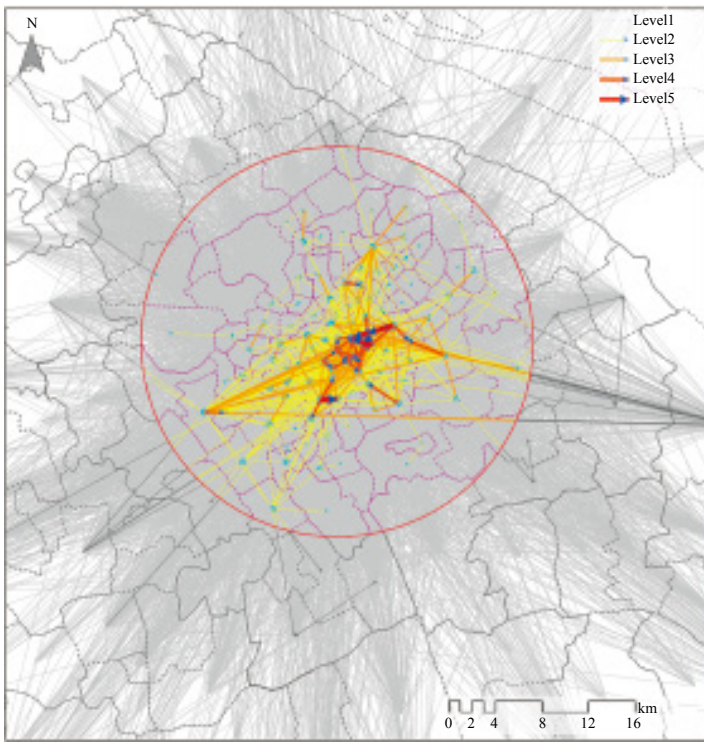


图3 上海市中心区的微博签到轨迹（汇总至人口普查单元）以及其长度与时长分布

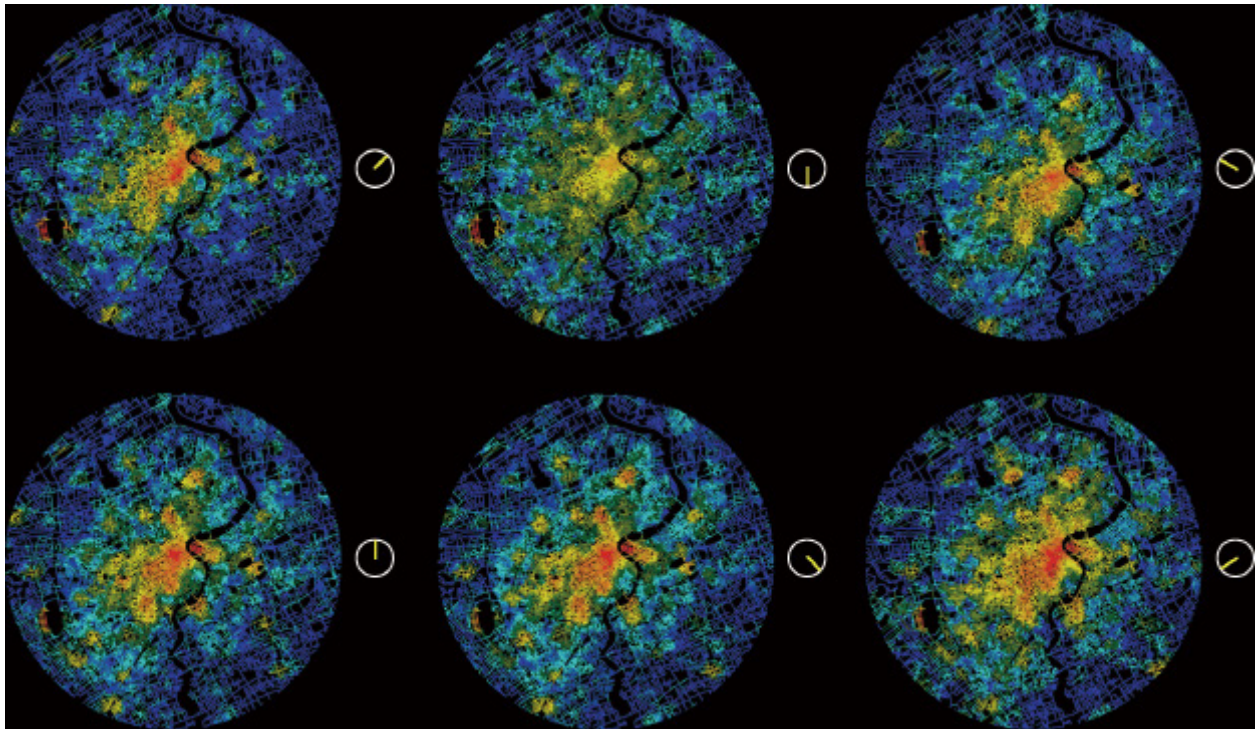


图4 上海中心区域时空共现潜力分布

从一条街道延伸到另一条，或者从通勤干道延伸到主要生活干道，进而可能在非工作时间转移到支路（图 5 左）。由此不难看出，城市的时空共现潜力的中心街道并非总是服从基于米制距离的空间自相关模式，而是呈现出街道之间拓扑联系的重要影响。本节进一步对动态时空共现潜力的概率分布形态做拟合，可以发现得到的共现潜力基本都符合对数分布形态，并显出明显的左偏态。为探究空间组构在时空共现潜力测度上的影响，本节分别对引入与不引入组构距离参数 d_g^w 所得到的潜力指数的概率分布做了 Weibull 拟合，得到的形态参数，前者明显高于后者（图 5 右）。这说明引入了组构距离后的潜力指数更加符合长尾分布的特点，即只有少数街道能够支持极大的共现潜力，而大部分街道只支持相对较少的共现潜力。这也一定程度上说明在地理距离的基础上，城市组构不仅影响人们的汇集，也影响人们互动的具体空间结构。

本节还进一步对每一小时的时空共现潜力指标与传统空

间句法的指标以及城市功能连接度指标^[32]的相互关系做了探析。与空间句法中心性不同，城市功能连接度反映的是城市功能布局在城市组构连接状态下的中心性，包括连接密度、多样性与平均连接距离。因此，这个分析能够帮助我们理解在指定的时间截面上城市空间形态与功能布局与共现潜力的关系（图 6）。通过在每一个截面构建简单的多元线性回归模型，我们发现城市时空共现潜力受到城市空间组构与功能组构的双重影响 ($R^2 > 0.7$)，并且后者的影响更加显著且稳定。这一方面说明在高频城市视角中，传统空间句法理论中的出行的经济模型中所假设的空间与功能的相对应稳态很难被观察到（在更多的情况下，城市空间形态与功能布局将一起决定着自然人流的分布以及其所标示的人们之间的互动潜力）^[32]；另一方面，时空共现潜力的分布本身表征了城市形态的特征与功能布局的互动结果，这本身也是一种组构中心性的自显。因此，时空共现潜力也是一种组构中心性，且较之于空间句法中心性度量有着更丰富的社会内涵。

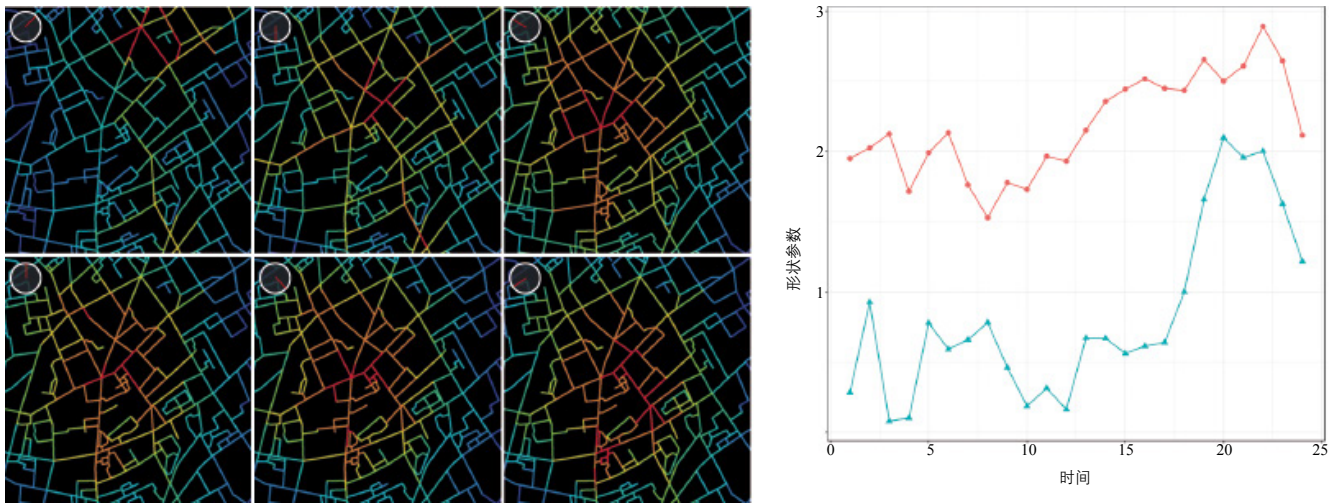


图 5 某区域的时空共现潜力分布随时变化图（左）以及上海市中心区域的时空共现潜力指数 weibull 拟合的形状参数（右）

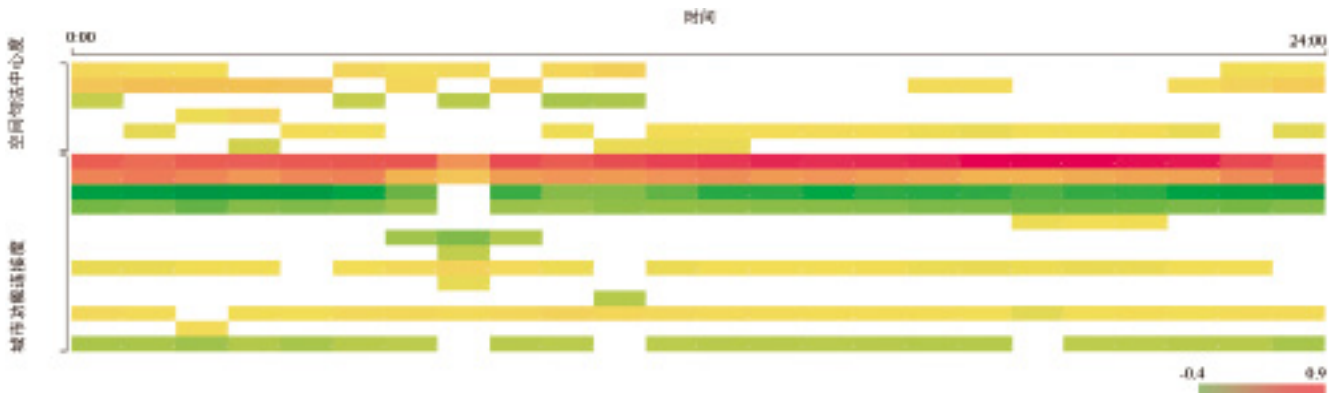


图 6 不同空间句法中心度量与时空共现潜力的关系

3.3 时空共现潜力的模式：一种新的空间网络层级结构

基于上文所提出的概念模型，我们可以继续运用模式识别手段来识别时空共现潜力分布的典型模式及其分布。假设 M_i 是地点 i 关于其承载的时空共现的类型归属，那么它可以被定义为 $M_i = g_i(D_s^{i\Delta t}, D_t^{i\Delta t}, d_g^{ij\Delta t}), \{d_m^{ij\Delta t} \leq d_m\}$ 。其中 g_i 是一个判别函数，而将三种影响共现潜力的距离作为特征向量。据此，时空共现潜力的模式发现，可以将复杂多维的时空信息适度地压缩成为空间信息，提示我们关于时空共现潜力的氛围是如何在每一个空间的连接处转换的，这将成为前文所述定量极差理解的一种补充。

在上海中心区的实例中，时空共现潜力的模式呈现出了一种典型的空间网络层级结构（图7），共有五种主要类型的街道：城市中心街道、通行街道、日常街道、邻里街道以及非中心街道。前四种类型是主要的城市街道，具有较高等级的共现潜力，而非中心街道所支持的社交互动则相对有限。城市中心街道主要包括市中心内若干连续的活力街区以及重要交通枢纽周围的街道，它们能够支持全天连续的时空共现并用尽量少的组构距离将人们在街道中联系起来。通行街道包含了许多城市干道，虽然人们在这些街道中出现得相对较少，但是组构距离短。日常街道附近有较多的人流分布，但是由于它们一般连接通行街道与社区内部入户街道，因此人们共现需要克服的组构距离较大。邻里街道更贴近人流汇集区，但是受城市形态影响很大，人们为了相遇需要克服极大的组构距离。事实上，本实例中很多的邻里街道都是城市中心区的里弄，它们充分靠近主街，拥有便利性，同时在空间

设计上保证了很大的隐私性。时空共现潜力的模式结构似乎一定程度上符合城市路网的分级特点，表明城市路网系统，作为一种公共空间网络也在影响着人群的社交，这种关系的构建不仅与交通设计有关，更与城市形态密切相关。

事实上，我们将影响时空共现潜力的特征向量在其涌现的模式特征中稍做梳理就可以更加明晰地从时空共现的角度理解城市公共空间形态的功能特征（图8）。我们可以首先将五种类型街道按照共现时长（ $D_t^{i\Delta t}$ ）与社会混合度（ $D_s^{i\Delta t}$ ）的递减进行排序，并进一步按照组构距离（ $d_g^{ij\Delta t}$ ）对五种类型街道进一步分类。中心街道被定义为城市的共现社交中心，邻里街道与日常街道所组成的地区勾勒出城市散步的逐个共现社群，而通行街道则是联系社交中心与社群的路径。这三种结构表明了一种从社交角度看待城市形态结构的功能等级的可能。

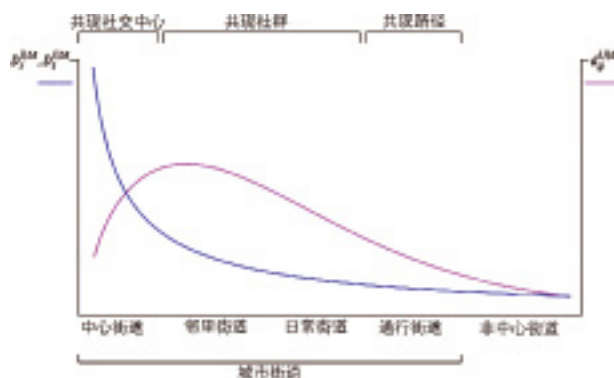


图8 时空共现潜力指标所揭示的街道功能类型

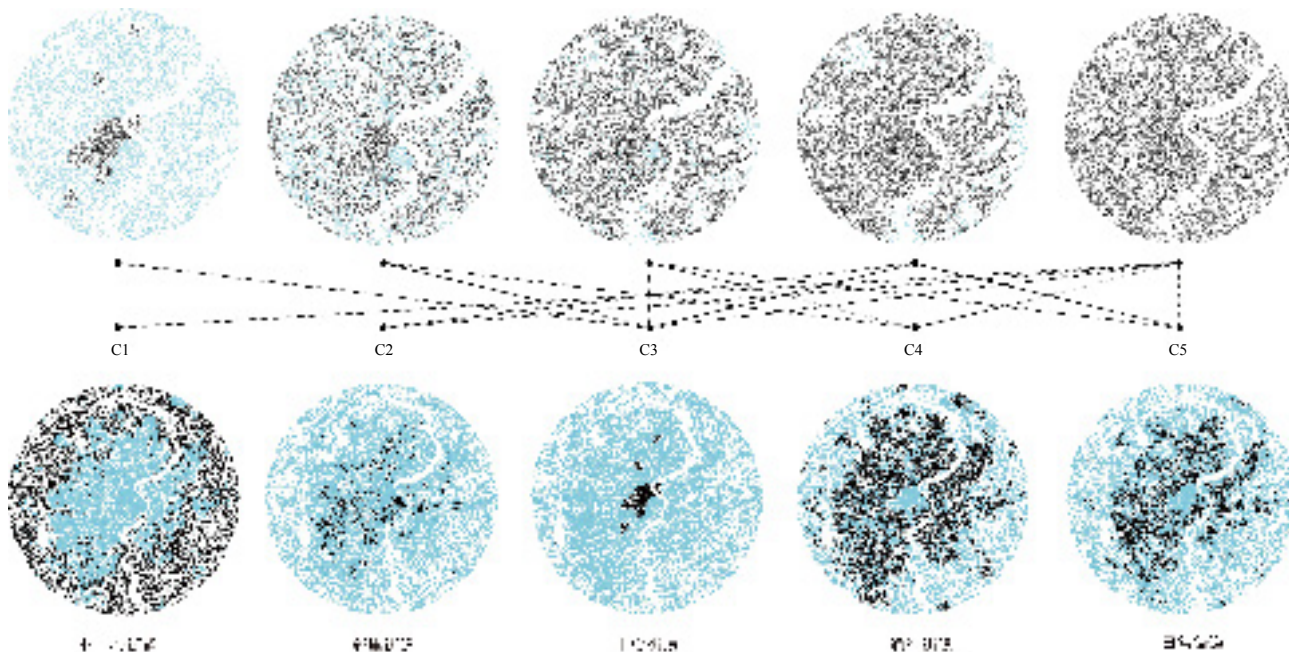


图7 时空共现潜力的层级模式

4 总结与讨论

4.1 行为组构：一种可见的空间组构

本文讨论了在高频城市背景下城市空间组构的分析框架，给出了一种可能的途径来度量人们的时空共现潜力，并初步证明其可以作为城市空间组构动态效应的一种测度方法。事实上，这样的分析路径可以被概括为用行为组构来表征空间组构的动态属性，并对其内涵做了新的延伸。人流活动较之物质空间更容易被明确地感知并形成对空间氛围的理解，而人流活动布局本身即是一种组构，其联系的逻辑反映了人们对空间组构理解和使用的形态逻辑。

较之传统的空间句法模型，本文提出的时空空间潜力模型具有鲜明的特点（表 1）。首先，它关注的不仅是空间组构，而是其影响下的行为组构，具有明显的时空动态特征。其次，传统空间句法关注的是城市演进过程中的稳态，而本文提出的模型能够妥善兼顾二者的关系，即在动态中发现稳态，同时发现稳态涌现的条件和复杂性。在数据支持方面，时空共现潜力模型结合了空间网络与时空行为数据，提出了以对社会互动潜力的测度代替纯粹空间网络中心性指标来表征组构动态效应的途径。此外，时空共现模型的相关结果表明其分布不仅受空间组构的影响，也受功能布局等因素布局的影响。而在方法论方面，传统空间句法模型主要是描述性预测，而本文提出的模型可以充分利用当前迅速发展的数据挖掘与空间分析手段。最后，传统空间句法模型是基于较低频的城市视角，本文提出的方法则是面向高频城市并可以通过对高频组构效应的稳态发掘来补充传统低频视角的不足。

以上所提及的时空共现潜力模型的特点实际也回应了本文开始时论述的传统空间句法在当前面临的困境，并提供了一种新城市科学背景下人本城市设计分析的途径。虽然时空大数据可以提供人流分布的即时状态，却通常难以直接表征他们的空间逻辑。本文提出的框架可以帮助厘清人流分布的组构逻辑，进一步帮助我们探究城市形态如何服务于人们的社交互动。同时，本文提出的方法可以度量出组构中心性对

于自然人流汇集的动态效应，避免在传统空间句法模型中对于时空差异的过度简化。此外，这一方法有充分的扩展空间，可根据不同用户定义而改变所度量的结果。这在很大程度上避免了传统空间句法中缺乏对于使用者类型的相关讨论这一不足。与此同时，本文提出了一种将时空轨迹数据与空间句法模型相融合的可能路径，表明空间句法理论对于揭示城市空间行为数据背后的形态逻辑的重要意义。因此，行为组构研究作为面向高频城市的组构研究的一种途径，能够弥补当前空间句法发展的理论与方法的相关问题，是一种面向未来城市设计的解决方案。

4.2 面向高频城市设计

随着城市管理智能化与精细化，城市空间作为城市活动的容器需要为更多即时的社会经济效应的优化提供可能性。本文提出的方法提供了一种方式来指导高频城市背景下的形态规划设计。它具备空间句法研究的优势，一方面它是基于矢量的空间模型，可不受可变研究单元问题的影响；另一方面它对于局部的形态变化非常敏感，使其在充分表征数据分析结果精确性的同时，保留规划师对于空间干预的主动权。

假设本文所提的方法可作为支持高频城市设计的一种途径，那么从构建这样一种方法的过程中，我们可以窥见高频城市设计较之传统城市设计的一些特点，厘清这些特点将有助于我们未来规划具有兼顾动态效应的城市形态。首先，高频城市设计需要支持新的、高频的城市要素。在空间句法的出行经济模型中，高频的人流轨迹同时受到较低频的空间形态与较高频的功能布局的影响，这意味着城市功能布局，或者说活动的形态设计，以及其与城市形态的关系是支持高频城市效能的一个重要部分。其次，在高频城市中涌现的动态的城市问题仍需要进一步界定，特别是不同社会现象的变异性（variability）与规律性（regularity），以帮助建立评价高频城市设计效用的可能途径。此外，面向高频城市的规划设计绝不是对于传统城市设计的批判和抛弃，相反，高频城市设计需要更加妥善地处理超短期的、高频规划目标与长期规划目标之间的关系，以及后者是如何在前者当中涌现的。因此，通往高频城市设计需要在规划设计中寻找可以操作的高频城市要素，更加明确与之相关的动态城市问题，并确定超短期目标与长期目标之间的关系。

4.3 新数据环境下空间句法理论的重构

本文在充分尊重空间句法理论模型的前提下，试图在当前新的数据条件下探索如何发展空间句法理论与方法，使之更加契合当前和未来城市科学与规划设计的发展趋势，并提供了一种在高频城市视角下，空间句法理论重构的具体途径。

表 1 时空共现潜力模型与传统空间句法模型的比较

维度	空间句法模型	时空共现潜力模型
要素	空间组构	行为组构
关注点	稳态	动态与稳态
数据	空间网络数据	空间网络与时空行为数据
度量	空间网络中心度	社会互动潜力
影响因素	空间结构	空间结构与其内容的互动
路径	描述性预测	数据挖掘
频度	低频	高频与低频

这种重构主要体现在几个方面：(1) 主流数据所代表的城市要素需要在空间句法模型中得以体现，以明确它们与城市形态之间的互动关系；(2) 城市组构并非只是城市形态自身的属性，任何与之相关的功能性布局都可以成为一种新的组构，且组构联系对于不同的功能布局而言很可能存在不同的具体意义；(3) 需要体现人们的社会属性对于空间组构分析的作用，即关注自然人流的“质量”而非只是规模；(4) 需要兼顾高频城市视角来构建城市形态与社会经济效应之间的联系模式。本文试图通过对空间句法理论的回顾来构建一种更动态的空间句法分析框架，以回应这种重构的一种可能的形式。与此同时，本文强调新数据的出现并不总意味着传统理论与模型的淘汰。相反，如果我们能够妥善地明确新形式下的趋势，可以借助新的数据条件拓展这些理论，使之帮助我们更好地理解当下以及未来的城市，发展新的城市科学观与方法论，面对更加复杂的规划设计议题。 **UPI**

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] VIRILIO P. Speed and information: cyberspace alarm! [J]. *Ctheory*, 1995, 18(3): 8-27.
- [2] URRY J. *Sociology beyond societies: mobilities for the twenty-first century* [M]. Routledge, 2012.
- [3] WEBSTER F. *Theories of the information society* [M]. Routledge, 2014.
- [4] BATTY M. Digital twins [J]. *Environment and Planning B*, 2018, 45(5): 817-820.
- [5] WILDFIRE C. How can we spearhead city-scale digital twins? [J/OL]. *Infrastructure Intelligence*. (2018)[2018-0803]. www.infrastructure-intelligence.com/article/may-2018/how-can-we-spearhead-city-scale-digital-twins.
- [6] BATTY M. *The new science of cities* [M]. Mit Press, 2013.
- [7] HILLIER B, PENN A, HANSON J, et al. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1993, 20(1): 29-66.
- [8] HILLIER B, IIDA S. Network and psychological effects in urban movement [C]. *International Conference on Spatial Information Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005: 475-490.
- [9] TURNER A, PENN A. Encoding natural movement as an agent-based system: an investigation into human pedestrian behaviour in the built environment [J]. *Environment and planning B: Planning and Design*, 2002, 29(4): 473-490.
- [10] TURNER A. Analysing the visual dynamics of spatial morphology [J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2003, 30(5): 657-676.
- [11] HILLIER B. Cities as movement economies [J]. *Urban Design International*, 1996, 1(1): 41-60.
- [12] HILLIER B. Spatial sustainability in cities: organic patterns and sustainable forms [C]. *Royal Institute of Technology (KTH)*, 2009.
- [13] YANG T, HILLIER B. The fuzzy boundary: the spatial definition of urban areas [C]. *Proceedings, 6th International Space Syntax Symposium, Istanbul*, 2007.
- [14] HILLIER B, TURNER A, YANG T, et al. Metric and topo-geometric properties of urban street networks: some convergences, divergences and new results [J]. *Journal of Space Syntax*, 2010, 1(2): 258-279.
- [15] PENN A. Space syntax and spatial cognition: or why the axial line? [J]. *Environment and Behavior*, 2003, 35(1): 30-65.
- [16] HILLIER B, SHINICHI I. Network and psychological effects in urban movement [C]. *International Conference on Spatial Information Theory*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005.
- [17] JIANG B, TAO J. Agent-based simulation of human movement shaped by the underlying street structure [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2011, 25(1): 51-64.
- [18] VAUGHAN L. The spatial syntax of urban segregation [J]. *Progress in Planning*, 2007, 67(3): 199-294.
- [19] VAUGHAN L, CLARK D L C, SAHBAZ O, et al. Space and exclusion: does urban morphology play a part in social deprivation? [J]. *Area*, 2005, 37(4): 402-412.
- [20] LEFEBVRE H. *The production of space* [M]. Vol. 142. Blackwell: Oxford, 1991.
- [21] PEPONIS J, ROSS C, RASHID M. The structure of urban space, movement and co-presence: the case of Atlanta [J]. *Geoforum*, 1997, 28(3/4): 341-358.
- [22] HILLIER B, HANSON J. *The social logic of space* [M]. Cambridge University Press, 1989.
- [23] ITO M, OKABE D. Intimate visual co-presence [C]. *2005 Ubiquitous Computing Conference*, 2005.
- [24] MITCHELL D. The end of public space? people's park, definitions of the public, and democracy [J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 1995, 85(1): 108-133.
- [25] JACOBS J. *The death and life of American cities* [M]. New York: Random House, 1961.
- [26] BACKSTROM L, SUN E, MARLOW C. Find me if you can: improving geographical prediction with social and spatial proximity [C]. *Proceedings of the 19th International Conference on World Wide Web*. ACM, 2010: 61-70.
- [27] KOSTAKOS V, O'NEILL E, PENN A, et al. Brief encounters: sensing, modeling and visualizing urban mobility and copresence networks [C]. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)*, 2010.
- [28] TURNER A. Angular analysis [C]. *Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Syntax*. Atlanta, GA: Georgia Institute of Technology, 2001.
- [29] MARCUS L, LEGEBY A. The need for co-presence in urban complexity: measuring social capital using space syntax [C]. *Eighth International Space Syntax Symposium*, 2012.
- [30] HILLIER W R G, YANG T, TURNER A. Normalising least angle choice in depthmap and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of city space [J]. *Journal of Space syntax*, 2012, 3(2): 155-193.
- [31] WU L, ZHI Y, SUI Z, et al. Intra-urban human mobility and activity transition: evidence from social media check-in data [J]. *PloS one*, 2014, 9(5): e97010.
- [32] SHEN Y, KARIMI K. Urban function connectivity: characterisation of functional urban streets with social media check-in data [J]. *Cities*, 2016(55): 9-21.

(本文编辑：王枫)