

基于多源数据空间句法分析的数字化城市设计 ——以武汉三阳路城市更新项目为例

Digital Urban Design Using Space Syntax Analysis Based on Multi-source Data:
An Urban Renewal Project in Wuhan Sanyanglu Area

盛强 方可
Sheng Qiang, Fang Ke

摘要: 实现数字化城市设计的理想需要立足于以数据为基础的实证研究及将研究成果应用于设计的工作方法。本文以武汉三阳路地区城市更新项目为例,介绍空间句法模型如何综合利用网络开放数据、无人机航拍、实地调研等多种数据源,在城市尺度初步概念设计阶段和街区尺度设计方案深化阶段对这些数据进行空间分析,并将结论应用于基地潜力评测、方案比较和优化等辅助设计工作中。

Abstract: Achieving the aim of Digital Urban Design relies on an established framework which integrated research and design methods. This paper presents an urban renewal project in Sanyanglu area in Wuhan. It focuses on the way space syntax model connecting multi-source data such as web-open data, drone video and fieldwork survey. This data-based spatial model is used at different scales ranging from city to neighborhood. It is also used at various stage of designing processes from concept design, option testing and optimization.

关键词: 网络开放数据; 无人机航拍;
街景地图; 空间句法;
数字化城市设计

Keywords: Web-open Data; Drone Video;
Street View Map; Space Syntax;
Digital Urban Design

国家自然科学基金资助项目 (51208343、51678029)

作者: 盛强, 北京交通大学建筑与艺术学院, 副教授
方可, 武汉市规划研究院数字规划中心, 高级规划师, 主任工程师

1 空间句法与数字化城市设计

随着我国城市发展模式转入存量规划和品质提升的新阶段,以实证研究为基础的规划和设计方法逐渐被业界接受。在此大背景下,如何综合应用信息时代的各类数据资源,将对数据的分析落实到空间设计层面,逐渐成为行业的热点话题。信息技术对数字化城市设计的支持可以被简述为数字化描述、数字化解释、数字化预测三方面:数字化描述指综合应用各类新数据源对特定的城市现象进行可视化或识别的一系列基础研究,如利用百度兴趣点(POI)、点评数据、城市灯光、街景地图、刷卡数据、手机信令等进行城乡边界、活力区域、绿化/绿视率、居民通勤行为等现象的描述^[1-4]。这些新的数据源相对于传统用地或开发量的数据能够更为精准地反映城乡居民,甚至是特定人群对物理空间的使用方式,使得我们对城市的描述超越了简单的物理空间形态,而深入到其对使用者行为的影响。数字化解释则指对数字化描述现象背后的规律或机制展开的基础研究,这些现象本身不一定是基于新数据发现的,但其分析方式多采用数字化工具进行,大到城市中心区演变^[5,6],小到可步行性的环境要素分析等^[7,8],其核心是发现现象与其他因素之间的关联性。在此基础上,将这些研究成果应用于数字化城市设计则需要通过大量的实证研究积累验证这些关联性的适用条件,搞清这些规律在何种尺度上发挥作用。简言之,由于设计需要的是对未来的预测,因此要挖掘的是现象之间关联性背后的因果,从而形成一套将数据与设计目标联系起来的方法。

空间句法理论及模型对于实现数字化城市设计理想的价值在于以下两点:首先是“预测性”,多年的实证研究表明空间句法对街道空间拓扑形态的量化描述与城市中的各类交通运动和活跃功能分布均有良好的相关性^[9-11],以此为基础可以基于设计方案对使用者行为进行预测。其次是“可操作性”,空间句法模型抓住了空间形态这个要素,进而为功能用地的落位提供了基础结构,空间与功能的结构则是规划与设计工作的核心。

近年来,国内已有部分城市规划和设计项目中应用了空间句法模型,但在项目不同阶段、不同尺度上结合多源数据分析的空间句法项目仍不多见,本文将以此武汉三阳路地区的城市更新项目为例,详细介绍空间句法在该项目的前期概念设计、中期设计过程决策与方案比较,并着重介绍在不同阶段中对数据分析的过程与其设计应用。

2 项目背景：人本主义街道理念下的城市更新

2.1 项目概况

武汉市三阳路片区北至武汉长江二桥、南至一元路、西至解放大道、南至汉口江滩，总面积 183 hm²，属于武汉市中较为中心的地段。近年来，轨道交通建设的实施和城市更新步伐的加快给该地区发展注入了新的活力。目前三阳路周边地区机动车交通需求仍然较高，未来三阳路向东南方向会开通一条隧道供机动车和地铁运行。随着近期国内学界和业界对绿色共享出行方式的推崇以及《上海街道设计导则》的出版，人本主义街道的理念也日渐深入人心。在此背景下，三阳路的城市更新项目自 2017 年 2 月—6 月，由武汉市规划研究院牵头，英国福斯特公司负责总体统筹规划设计，空间句法—北京交大联合实验室负责数据空间分析和辅助设计，联合完成了该地区的更新设计概念方案。在 5 个月的设计过程中，福斯特公司设计并深化了本区域的街道空间，设计理念源于对此历史区域的深入调研和对当下中国城市高速发展中如何提升公共空间品质的探索。该方案旨在重建基地的慢行系统，打造宜人的街道氛围，力求将此地区建设为以人为本而非服务于机动车的步行街区。空间句法在本项目中对福斯特公司的设计提案进行量化分析并基于交通流量预测对比各个方案，为实现人本主义街道的理想提供了重要的技术支持。

2.2 数据与模型

本项目使用的数据主要包括用地功能类数据和交通行为类数据，其中用地功能数据主要包括软件抓取的武汉中心城区（三环路以内）百度 POI 数据（含零售业与餐饮业）。交通数据主要依靠无人机航拍获取，除此之外，基于街景地图对百度 POI 的功能落在局部地区进行了手动修正，并对基地内老住区内居民的社会聚集情况进行了现场调研。

图 1 对比了三阳路周边地区用地类型现状与真实城市功能（零售业与餐饮业）分布之间的差异，不难发现很多居住用地性质的街道聚集了大量的商铺（如三阳路中段）。这种



图 1 三阳路周边地区用地现状图与百度 POI（零售与餐饮业）分布对比

自组织的特征正是空间句法模型擅长分析的，因此近期在城市尺度的空间句法研究与项目实践中百度 POI 是一种很常用的网络开放数据^[12]。

此外，当代的空间句法空间建模也往往应用到百度和高德地图的网络开放地图资源。本项目使用的武汉大区域尺度模型基于百度地图最高精度的道路网络抓取处理生成道路轴线，而后在三环路以内的中城区进行了道路双线合并，拓扑角度连续性检验及高架桥、隧道等立体连接处理等手动修正工作。需要说明的是空间句法分析往往需要足够大的建模缓冲范围，本项目使用的模型囊括了大约 3 000 km² 的广大区域，作为基础的轴线模型共计街道线段数 299 466 条。

2.3 分析及辅助设计方法

城市规划与设计项目往往在不同阶段涉及不同尺度的工作内容，具体在本项目中，按项目进程和尺度大体可分为城市尺度概念设计和街区尺度深入设计两个阶段（图 2）。

在城市尺度概念设计阶段主要采用的是百度 POI 数据。空间句法的工作内容包括两项内容：首先是对城市尺度餐饮零售业功能分布聚集（即城市中心活力的空间支持条件）进行分析；而后是该结论在基地内的应用，对设计师提出的功能分布进行空间可达性评价。

街区尺度深入设计阶段主要的工作内容包括：（1）基于无人机航拍视频获取各类交通流量数据并进行空间分析；（2）结合道路设计方案和基地外未来发展规划对交通量分布进行预测；（3）根据街景地图矫正后的商业功能落位进行高精度的商业分布空间分析；（4）根据三阳路地区道路网络设计方案进行机动车、自行车和步行流量分布预测；（5）对三阳路老住宅区户外社会聚集现象进行调研分析与设计应用。

3 城市尺度概念设计阶段的分析

概念设计初期福斯特公司基于对三阳路地区的实地调研，提出将该地区公共空间更新的主要概念定位在打造城市艺术区，并提供了武汉市 7 个与具有艺术特征的活力中心区

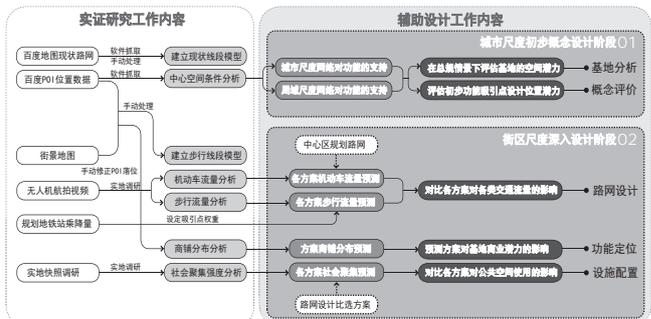


图 2 本项目的数据分析辅助设计工作框架图

案例。这7个案例包括武汉美术馆、K11 艺术中心、昙华林、湖北美术学院、403 国际艺术中心、汉阳造和 K11 艺术村，按其与市中心的距离排序编号依次为 A1-A7 (图 3)。需要说明的是，艺术仅仅是上述区域的主题定位，而这些区域具体的活力强度可以基于其周边的零售和餐饮数量来衡量。由于 POI 点的位置有一定误差，落位在空间句法高精度地图的道路上难免有很多点落在小区内部，用一定可达范围均匀化处理在大尺度范围分析中便成为一种必须的数据处理方式。图 3 为武汉三环内零售业与餐饮业 POI 点按 400 m 路网可达范围均匀化后的分布可视化地图，从中可以看出武汉市中心城区各个中心区域的活力等级差异。

既有的大量空间句法实证研究表明城市商业活力的聚集是不同尺度范围空间通达性的结果^[13,14]。一个片区在城市整体空间网络和局部周边街道网络中连接得越好，越能够支持更多的商业服务业功能产生。

简单来说，在线段地图分析下空间句法常用的参数分为整合度和选择度两个系列。前者衡量每个街道段在特定距离范围到其他所有街道段的角度拓扑距离，体现一种空间的中心性特征。后者衡量每个街道段在特定距离范围内被其他两两线段之间按综合折转角度最小原则定义的最短路径穿过的次数，体现一种空间被穿过的特性。在整合度与选择度这两个基本指标之上，2012 年 UCL 空间句法团队提出了标准化角度整合度 (NAIN: Normalized Angular Integration) 和标准化角度选择度 (简称穿行度 NACH: Normalized Angular Choice) 两个指标^[15]，其意义是进一步减少线段数量 (即街道密度) 对传统参数的影响，同时也实现了将不同半径计算结果处理到一个有效值域范围的效果，使不同尺度不同复杂程度的街道肌理可以更客观地对比其形态规整性差异。

一般来说，大尺度范围的选择度系数参数 (含穿行度) 与机动车流量分布有较高的关联，小尺度范围整合度系数参数对商业聚集有较高的关联。本项目具体对零售业和餐饮业在各案例聚集程度的对比选取了四组参数 (穿行度与选择度效果非常接近，故未在图 4 中表现)，其计算半径为

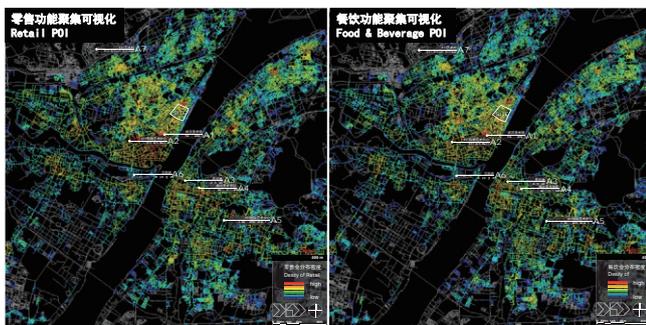
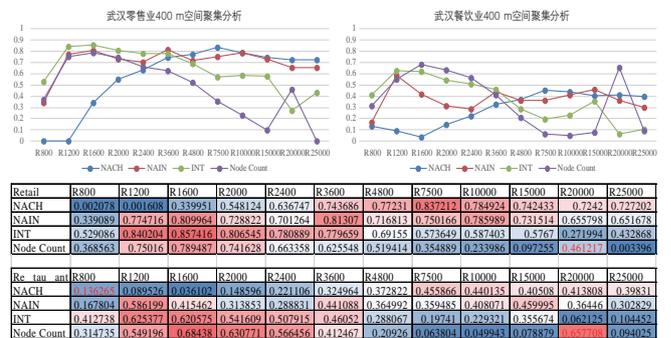


图 3 武汉市零售与餐饮数据可视化 (400 m 可达范围累加) 及设计基地和 7 个艺术区案例位置示意图

800 m~25 km 的 12 个梯度，其中穿行度取的是该案例中心处 200 m 范围内的最高值，而其他三个参数为案例区 (中心周边 400 m 可达范围) 的平均值。从图 4 的分析结果来看，穿行度对各案例商业聚集的决定系数随半径增加而提升，在 7.5 km 半径达到峰值后略有下降。整合度系数参数 (含 NAIN) 在 1 200~1 600 m 半径达到峰值后迅速下降。需要特别指出的是在此分析中小尺度半径街道密度 (Node Count) 指标与零售和餐饮业聚集也具有较高相关性但效果略低于整合度系数指标。这个结果说明武汉市的几个案例商业聚集分布符合一般的规律，即当某个片区在城市尺度范围具有较好的联系 (大半径穿行度值高，机动车流量高)，且在局部尺度范围与周边街道有较好的联系 (规整的小尺度街道网格)，则往往该片区也具有更多的零售餐饮业功能分布。

这个研究结果对设计的直接意义在于判断设计区域对城市商业功能聚集的空间承载力，同时也可用于在概念设计初期量化评测各拟建功能吸引点大致的入口落位。图 5 上半部分的散点图显示了三阳路地区 (计算点选取中山大道和三阳路上的各一个街道段) 城市尺度零售业分布与 10 km 半径穿行度 (左) 和 1 600 m 半径整合度 (右) 相较于其他各个案例区域的关系。从结果可以看出，由于选择的路段并非该区域最高级别道路，这两个点现状的零售业聚集量相对于机动车流量承载力而言是合理的，但相对于该区域规整细密的街道肌理而言，片区内的商业数量尚有较大的提升空间。换句话说，该地区的局部街道网络具有很大的潜力尚未释放出来。

针对这个分析结果，福斯特公司结合本区域内的既有工业和其他特色建筑分布位置提出了不同的功能吸引点：解放路入口区、艺术与设计产业区、换乘站区、三阳路核心区、保留老住区等等。基于前面案例分析阶段选用的城市尺度通达性和局部尺度通达性两个指标，可以量化评价这些特色吸引点及其拟设的入口位置的潜力。分析结果表明保留老住宅区在二曜路上的出入口和娱乐区在胜利街上的出入口潜力不高，建议后者转向沿江大道开口。



注：表格中数字为各半径空间句法计算参数与零售和餐饮业聚集密度的决定系数，红色背景 R² 值较高蓝色背景较低。

图 4 各案例艺术区零售业与餐饮业空间分布规律分析

4 街区尺度深入设计阶段的分析

基于百度 POI 数据可以对城市尺度商业服务业分布聚集情况及其支持的空间条件进行快速但精度较低的分析，但在城市设计和更新领域，针对设计基地周边小范围但高精度的空间分析往往对方案设计能发挥更大的指导作用。这个尺度的工作也对数据在质量上提出了更高的要求。针对本项目在街区尺度设计阶段的工作内容，我们综合采用了无人机航拍、百度街景、实地调研等数据收集方法获取了不同类型交通的截面流量、功能分布和社会聚集等数据源，有针对性地解决了不同的研究内容。

4.1 基于无人机航拍的交通流量分析与方案评测

三阳路地区更新的目标为重塑良好的街道步行网络，因此机动车的分布状况需作为一种限制性的因素考虑。随着近期无人机航拍在国内各规划院的普及，在空间句法研究中也起到越发重要的作用，特别是能够降低传统截面流量调研的人力成本。

受限于三阳路地区较多高层建筑，本项目仅在武汉规划研究院所在的三阳路中段建筑顶层平台起飞，约 400 m 高度与地面 45 度角倾斜向周边三个主要方向拍摄。拍摄时间为

某工作日 8:30—9:30, 11:00—12:00, 13:30—14:30, 16:00—17:00 共计四个时间段每个方向 5 分钟的视频，排除遮挡因素影响后实际获得 20 条街道截面上的机动车、自行/电动车和步行流量数据（图 6）。

由于三阳路中段近年来处于断路施工状态，现状流量数据的分析需在同样断路条件下的模型中进行。即便如此，车流量数据与 7.5 km 穿行度的决定系数还是达到了 0.649 的峰值，这个结论与此前在城市尺度范围对商业功能聚集的研究起到了相互印证的效果，说明该指标能够有效地反映车流量的通达性进而影响片区功能的聚集。但是从评测设计方案影响的目标来看，需要用作对比“现状”应该是道路未断路施工的状态，因此本项目中基于该回归方程计算了三阳路贯通时（2012 年地图）和预计 2020 年考虑周边城市发展后两个设计方案的影响对比（图 7）。图 7 中 2020 年周边路网状况考虑了本项目基地西北部分城市设计方案（同为福斯特公司设计的另一个城市设计项目）及武汉中心城区范围已确定建设的道路网络调整方案。用作对比的两个设计方案差别在于方案 1 将三阳路公园绿地布置在路中，南北两侧为单向车道。方案 2 将公园布置在路北，而南侧为 6 车道。

从对比预测分析的结果来看，两个方案的共同点是基地中心中山大道会具有明显的流量提升，沿江大道微涨，胜利路随比例涨幅较高但基数较低，而三阳路地铁站所在之京汉大道西南段车流量预计增长，东北段则预计降低。需要说明的是，造成基地内流量分布变化的主要诱因是城市周边地区的路网调整，特别是跨江隧道的建设增加了这个片区的交通

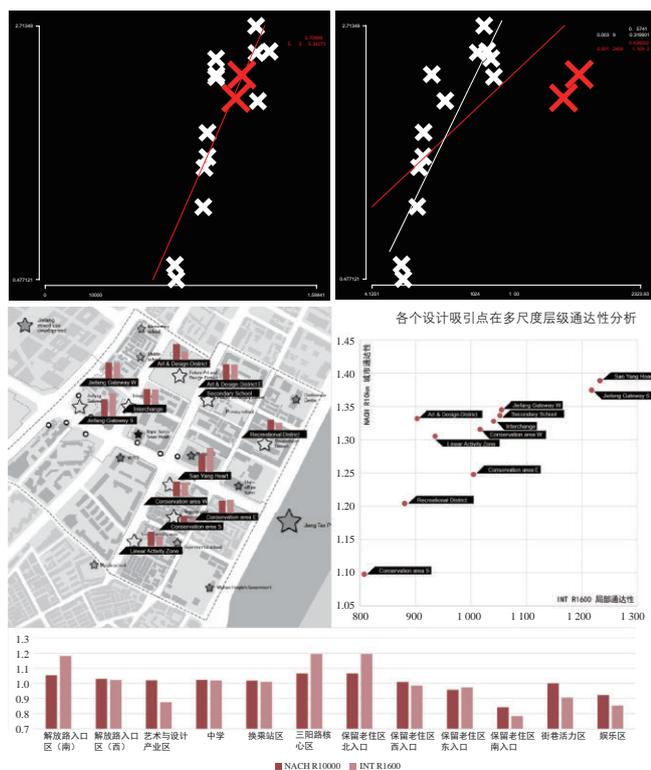


图 5 三阳路地区的零售业分布潜力分析及各案例艺术区零售业与餐饮业空间分布规律分析
资料来源：设计初步概念方案部分为福斯特公司提供，在此基础上作者自绘



图 6 基于无人机航拍视频获取的道路截面车流量数据空间句法分析



图 7 三阳路公园布置方案 1 与方案 2 相对于 2012 年改造前对车流量的影响评测
资料来源：道路设计方案为福斯特公司提供，分析图作者自绘

需求，因此从地面流量来看机动车流量并不会减少。此外，车流量增量除三阳路自身外，主要集中在东北—西南方向各条道路，西北—东南向的道路机动车流量很低，设置步行街对机动车交通的影响可忽略。从对步行者的观察经验来看，小于 500 车 / 小时的路段对步行穿越是基本安全的。因此方案 1 将车流量划分成两部分，有利于减弱道路两侧步行者到达公园，与福斯特公司设计团队讨论后确定为推荐方案。

与机动车流量分析类似，本研究对无人机获取的 19 个测点步行流量与空间句法参数进行回归分析选取适合的方案评测参数。与机动车流量相比，由于步行流量受轨道交通站点等人流集散点影响较大，分析往往需要综合常规空间句法参数和站点周边衰减效应的影响。基于笔者近年来对京津两城地铁出站大量实地跟踪轨迹数据分析的结果，这种站点周边的衰减效应可以用距离衰减 (metric step depth) 和角度衰减 (angular step depth) 两个参数组合来模拟。此外，基于航拍视频发现三阳路地铁站各出入口步行流量与周边步行流量比例为约 1:4，按此比例将站点周边衰减参数与 800 m 穿行度相加后与实测步行流量的决定系数最高 ($R^2=0.57$)，这种组合方式作为方案对比阶段步行流量模拟的基本方法。以此为基础，本项目对福斯特公司提供的两个步行系统方案进行了量化的评测。由于未来该地区还将开通新的地铁线路和站点，本项目按照交通部门提供的未来乘降量预测值对比三阳路地铁站的现状乘降量设定了权重，以 800 m 穿行度为基础对福斯特公司提供的两个设计方案进行了对比 (图 8)。

设计方案 1 (公园在道路中间) 对基地内的步行流量分布主要有以下影响：随着新轻轨站的使用，三阳路北端的流

量会有较大幅度的提升 (20%~30%)，中山大道的步行流量增量也较为明显，可达 14%~15%。而京汉大道北段则体现出流量稳定，并没有明显的提升。对比方案 1 与方案 2，总体来说方案 2 (公园在北侧) 对三阳路两侧的流量汇集作用更为明显，特别是在道路的西北侧和中段上。方案 1 则可以在中山大道上汇集更多的行人。下图中红色的百分比体现的数值是方案 2 相对于方案 1 提升或降低的百分比。

4.2 基于 POI 数据修正落位的商业潜力评测

如前所述，商业等活跃功能的空间分布和步行量分布是互为因果的。因此对三阳路地区的街道系统设计还应该考虑未来商业发展的趋势。在城市尺度的研究阶段对以片区为单位的商业聚集进行了分析，但其并未能解决各商铺在微观的街道尺度上如何分布的问题。本部分研究的商业分布数据主要基于街景地图对 POI 的空间落位进行修正后获得。具体的分析过程为在三阳路地区 33 个街道段上选取代表性的分析点，而后计算该街道段前后一定范围内考虑距离衰减后商铺 (零售 + 餐饮) 的总数量，该方法的技术细节可参考笔者对王府井地区餐饮业分析的相关论文^[4]。商铺数据经此法小范围均匀化处理后与各空间参数组合进行回归分析，其结果发现 10 km 穿行度与 800 m 半径整合度组合参数对商铺分布的决定系数为 0.387，其中 800 m 整合度起主要作用。由于本地区一直在改造更新过程中，这个结果相对比较合理。综合此前对步行流量的分析，800 m 的局部街道空间结构对步行流量和商业分布均有一定的影响，客观上起到了多源数据交叉验证的作用。

这个分析结果对比了三阳路设计方案及对改造前的推测，可以发现该区域内各个街道段上基于设计方案改造后商业分布潜力提升的幅度 (图 9)。除三阳路、京汉大道、中山大道、胜利路等主要道路网络商业潜力高且有明显提升外，值得注意的是四纬路如能与解放大道西北侧城市设计的道路有效联系，则可大幅提升其商业潜力，同时在车流量预测时此街道具有很低的机动车流量，因此非常适合打造为具有活力的步行小街，聚集大量小商铺。类似的情况还包括基地北边界的解放公园路。

4.3 基于实地调研的社会聚集潜力评测

塑造富于活力的街道不仅仅需要合理的慢行交通组织与用地功能配置，同样需要提供适合人群聚集和交往的场所。在本项目初期概念设计阶段，福斯特公司的设计团队便对设计基地中坤厚里等老住宅区进行了实地调研，记录了居民社会聚集现象并试图将其空间特征作为公园设计的形态原型。基于本项目团队近期在北京的相关研究经验，我们在



图 8 设计方案 1 与设计方案 2 的步行量分布对比
资料来源：设计方案由福斯特公司提供，分析图作者自绘

深化设计阶段采用类似的调研方式对坤厚里等周边三个老社区进行了平日和周末各一天，每天四个时间点（8:00—9:00、11:00—12:00、14:00—15:00、17:00—18:00）的实地调研，以照片的方式记录居民聚集现象并对其中因摊贩等街头工作者形成的聚集进行了区分。由于该分析需要更高精度的线段地图，调研的同时也对这些老住宅区内部的路网及各居住单元的户数进行了实地调研。图 10 展示的是该地区社会聚集和路网及户数详图。

基于上述信息建立更高精度的线段模型后，计算不同半径的整合度和选择度对数值与居民聚集量数据分别进行回归分析，其结果发现采用 400 m 半径整合度单个指标的决定系数最高可达到 0.3 以上（图 11）。采用两个空间句法参数进行多元回归分析时，400 m 半径整合度与 1 200 m 选择度组合后的 R 平方值在 0.44。这一小一大两个半径的空间句法参数可以被理解为街区周边局部空间联系的影响和外部空间联系的影响。然而由于样本数量有限，且这两个因子有较强的自相关（造成 1 200 m 选择度对数的 P 值较高），不适合采用该多元回归方程进行预测。

深入社区内的居民聚集量与更高级别道路中的聚集量未必呈现线性的增长规律，且 0.3 的决定系数用于预测也比较勉强。因此，在对设计方案 1 和方案 2 的对比评测中，我们采用了基于 400 m 整合度指标划分五个等级的方式来为各个拟设立的活动区域评级。这两个设计方案均基于前期步行流量等级预测的结果对公共空间进行深化设计，街头活动聚集区域被优先设置在了步行流量分布预测等级较高的街道一侧（特别是在靠近解放大道的入口区）。方案 1 仍是路中布置公

园，方案 2 则主要在北侧结合建筑前广场布置公园。从分析结果对比来看，设计方案 1 除在三阳路中段得分较低外，其他两段都相对较高。而从其对步行穿过流量的利用效率来看，由于方案 1 采用的是直接穿过公园的模式，其利用效率较高（图 12）。

5 结语：多源数据在空间句法项目实践中的综合应用评价

三阳路的城市更新项目充分体现了新数据收集技术与数据源对城市规划和设计的支持作用。在城市尺度，商业服务业等活跃功能 POI 体现出的中心结构能够很好地被空间句法模型分析并锁定相应的空间参数。在街区尺度，空间句法研究与实践需要与其空间模型精度匹配的数据，而街景地图等开放数据资源同样也可以用于 POI 数据的落位修正和对步行路网的高精度建模中。总之，网络开放数据的应用大幅降低了数据获取和实地调研成本，预计将会迅速推进数字化城市设计的发展。

然而，在本案例中同样可以发现网络开放数据或大数据等新数据源尚不能代替传统的调研。例如在截面流量分析中，手机信令等大数据短期内尚难以在街道精度上还原为街道尺度个体的轨迹，摩拜单车、出租车等数据源也往往聚焦于某种特定的交通工具，因此无人机便成为一种快速获取截面流量类数据的工具。类似情况还包括对社会聚集的研究，实地调研仍是我们获取数据的有效方法。

此外，多种类型数据的综合应用还可以通过对不同研究的交叉验证强化对基础理论模型的理解。例如对城市尺度商

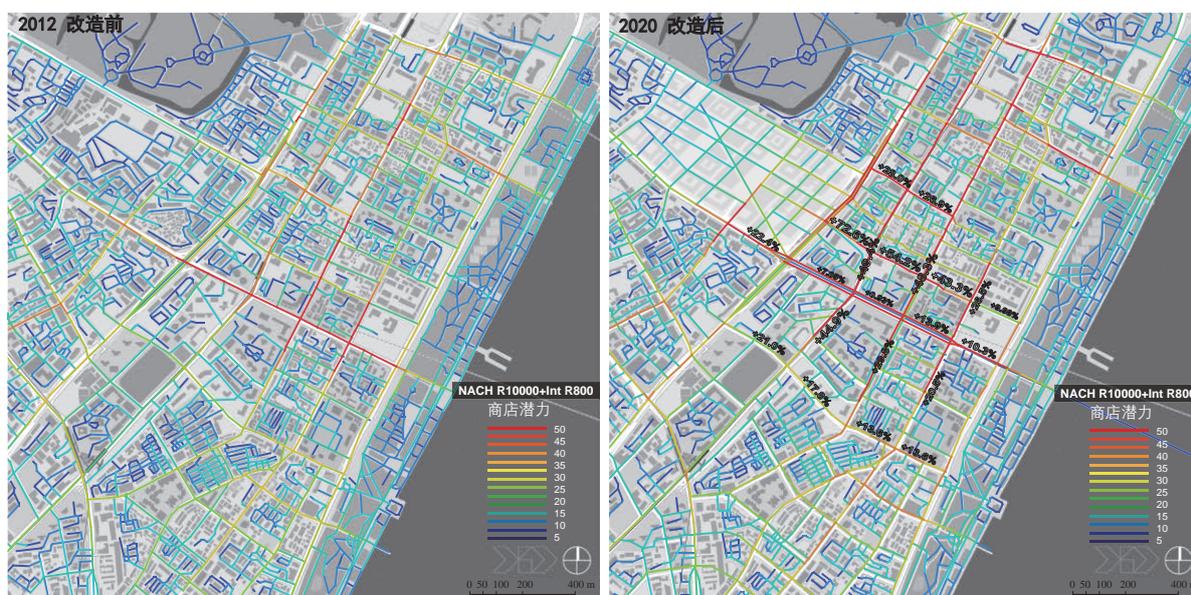


图 9 三阳路地区改造前后商业分布潜力对比
资料来源：设计方案由福斯特公司提供



图10 三阳路地区老住宅区居民社会聚集状况(上)和路网及单元户数详图(下)

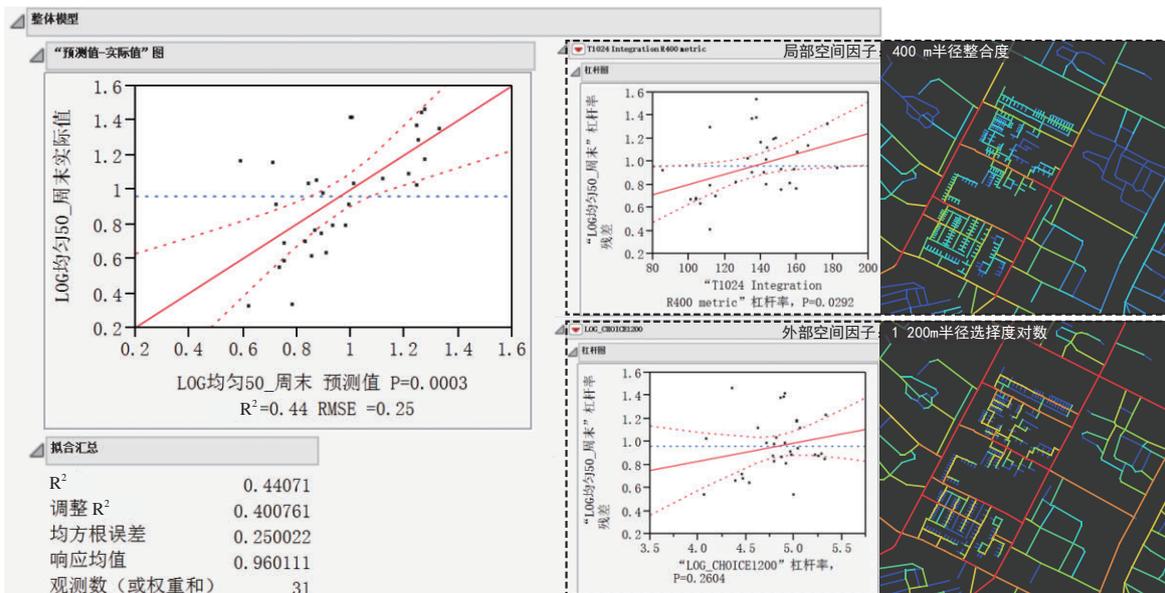


图11 三阳路地区老住宅区细化线段模型空间句法指标与居民聚集量的多元回归分析

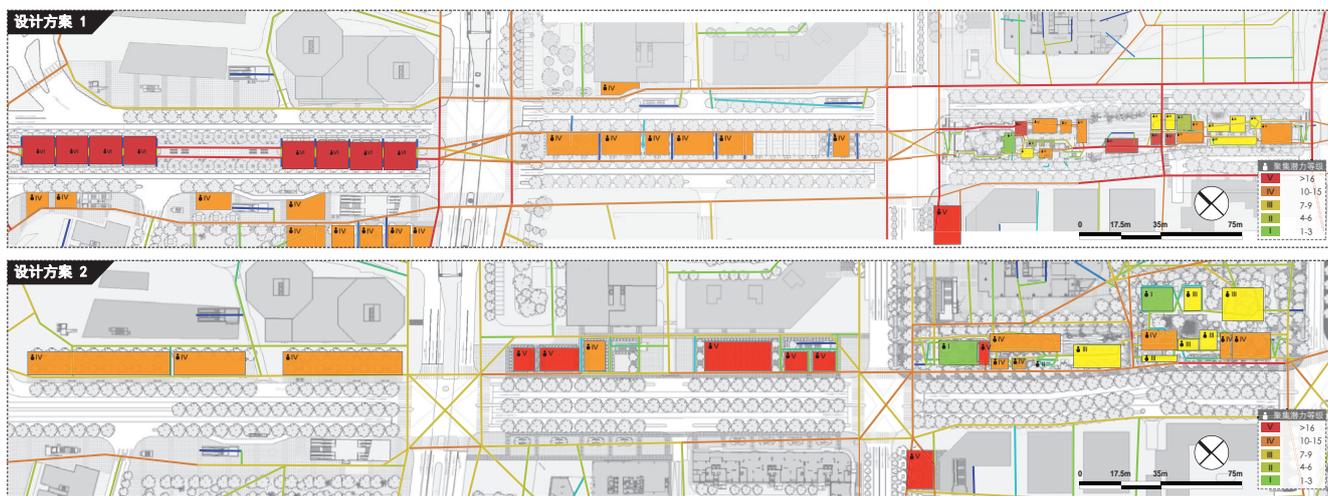


图 12 两个设计方案公共空间使用等级对比

资料来源：设计方案由福斯特公司提供，分析图作者自绘

业功能聚集的空间支持条件分析在大尺度上指向了与车流量数据分析相同的空间句法参数，而城市尺度的功能聚集与街区尺度的分布研究则指向了不同的参数。这种差异和数据均匀化的方式以及分析的尺度范围均有关系。多源数据不同尺度的综合分析有助于在交叉验证结果中揭示个例规律背后的普遍规律。事实上，近期对北京、天津、固原、吉林等其他诸多城市内各个街区的流量分析均体现了一个类似的趋势，即对机动车尺度的分析结果往往比较稳定（7.5~15 km 半径的穿行度效果最好），在本项目中甚至在道路断交情况下的数据仍体现出一致的规律。由此可见当代城市尺度道路系统的形态结构对机动车流量和功能聚集的影响机制是类似的，各个城市尽管形态不同，在机动车主导的尺度范围其空间规律都是相近的。而城市之间或城市内不同街区之间的差异则更多的体现在小尺度的街道空间系统中，它们体现了一种属于本地的、异质化的空间逻辑（但并非没有逻辑）。从这个角度来讲，多源的数据本身即蕴含了多维的视角。数字化城市设计的目标不可能通过提供唯一的普适算法来实现（类似工业化城市设计），综合多种数据分析挖掘数据背后的空间规律，并将这些规律其应用于本地的设计才能充分体现技术对的人文关怀。UPI

注：文中图片如无注明，均为作者绘制。

参考文献

[1] 钮心毅, 丁亮, 宋小冬. 基于手机数据识别上海中心城的城市空间结构[J]. 城市规划学刊, 2014(6): 61-67.
 [2] 钮心毅, 丁亮. 利用手机数据分析上海市域的职住空间关系——若干结论和讨论[J]. 上海城市规划, 2015(2): 39-43.

[3] 龙瀛, 张宇, 崔承印. 利用公交刷卡数据分析北京职住关系和通勤出行[J]. 地理学报, 2012, 67(10): 1339-1352.
 [4] 吴健生, 刘浩, 彭建, 马琳. 中国城市体系等级结构及其空间格局——基于 DMSP/OLS 夜间灯光数据的实证[J]. 地理学报, 2014, 69(6): 759-770.
 [5] 张莉, 陆玉麒. 基于可达性的中心地体系的空间分析[J]. 地理科学, 2013, 33(6): 649-658.
 [6] 杨俊宴, 史北祥. 城市中心区圈核结构模式的空间增长过程研究——对南京中心区 30 年演替的定量分析[J]. 城市规划, 2012, 36(9): 29-38.
 [7] KRIZEK K J. Pretest-posttest strategy for researching neighborhood-scale urban form and travel behavior[R]. Transportation Research Record 1722, 2000: 48-55.
 [8] HESS P M, Moudon A V, Snyder M C, Stanilov K. Site design and pedestrian travel[R]. Transportation Research Record 1674, 1999: 9-19.
 [9] 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: 29-66.
 [10] SCOPPA M D, PEPONIS J. Distributed attraction: the effects of street network connectivity upon the distribution of retail frontage in the City of Buenos Aires[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2015, 42(2): 354-378.
 [11] 叶宇, 庄宇. 新区空间形态与活力的演化假说：基于街道可达性、建筑密度和形态以及功能混合度的整合分析[J]. 国际城市规划, 2017, 32(2): 43-49.
 [12] YANG T. A study on spatial structure and functional location choice of the Beijing city in the light of big data[C]. The 10th Space Syntax Symposium, London, 119, 2015:119.
 [13] SIKSNA A. The effects of block size and form in North American and Australian City Centres [J]. Urban Morphology, 1997(1): 19-33.
 [14] CHIARADIA A. Emergent route choice behaviour, motorway and trunk road network: the Nantes conurbation[C]. Proceedings of 6th International Space Syntax Symposium, Istanbul: 2007: 078-01-078-18.
 [15] HILLIER B, YANT, TURNER A. Advancing DepthMap to advance our understanding of cities: comparing streets and cities and streets with cities[C]. Greene M, Reyes J, Castro A. Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium. Santiago de Chile: PUC: K001: 2012:1-15.

(本文编辑：秦潇雨)