

城市街道网络分析方法比较研究： 以Space Syntax、sDNA和UNA 为例*

宋小冬 陶颖 潘洁雯 肖扬

提 要 选取空间句法的轴线分析和线段分析、sDNA和UNA等四种网络分析方法，进行多个维度的系统比较分析。尽管四种方法理论框架的原型非常接近，但从定义方式、核心算法、计算结果上都存在显著差异。在城市尺度的研究趋势下，UNA的定义方式显得更加多元和丰富。研究发现搜索半径的选取对研究分析结果影响较大；在人流拟合环节，空间句法的轴线分析略优于线段分析。建议结合不同领域的实证研究，深入发掘城市街道网络的社会经济效应。

关键词 空间句法；sDNA；UNA；街道网络分析；方法比较

A Comparison of Analytical Methods for Urban Street Network: Taking Space Syntax, sDNA and UNA as Examples

SONG Xiaodong, TAO Ying, PAN Jiewen, XIAO Yang

Abstract: This study provides a systematic and multi-dimensional comparison of four network analysis methods, namely, axial line analysis, segment analysis from spatial syntax, and sDNA and UNA. Although the four methods are very close to the prototype of the theoretical framework, there are significant differences in the definitions, core algorithms, and calculation results. In light of the trend of urban-scale researches, the definition of UNA is more diverse and richer. The study finds that the selection of the search radius has a greater impact on the research results. In the flow fitting process, the axis analysis of spatial syntax is slightly better than the line segment analysis. It is recommended that researchers combine empirical research in different fields to explore the socio-economic effects of urban street networks.

Keywords: space syntax; sDNA; UNA; street network analysis; comparative study

1 城市街道网络分析方法的概述

20世纪下半叶，西方国家不断涌现出各种量化的城市模型和方法（M.Batty, P. Longley, 1994）。根据Wilson（2014）的研究，几乎所有城市模型都会关注以下3个指标：吸引力、距离、空间几何形态，特别是区域尺度（李涛，程遥，张伊娜，等，2017）。在城市尺度各种分析模型中，伦敦大学学院（UCL）研究团队所提出的空间句法（space syntax）因简单、易用而得到推广（B.Hillier, J.Hanson, 1989）。空间句法基于图论，对“点—线”建立拓扑关系，将社会网络分析方法引入建筑、城市物质空间，定量分析物质环境对人的活动、人对空间的感知（L.Marcus, M.Giusti, S.Barthel, 2016）。早期的空间句法建立在轴线模型（axial map）基础上，其含义是人在空间中的运动受视线的引导，这种定义在小尺度的建筑空间中得到很多实地观测结果的验证，对应的计算机软件有Axwoman。从建筑空间尺度扩大到城市空间尺度时，空间句法的计算结果和一般经验不符，受到一些学者的质疑（C.Ratti, 2004）。对此，空间句法研究团队，将原来的轴线模型扩展为线段模型（segment map）（A.Turner, 2007），计算方法、对应的计算机软件也有所改进（depth map），分析对象更加侧重于城市街道网络。

* 本研究由国家社科基金面上项目“社区凝聚力对流动人口心理健康的影响机制与对策研究”（项目编号：19BSH035）；高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室（同济大学）开放课题资助（项目编号：2019020203）

中图分类号 TU984 文献标识码 A
DOI 10.16361/j.upf.202002002
文章编号 1000-3363(2020)02-0019-06

作者简介

宋小冬，同济大学城市规划系，高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室，教授，
spt@tongji.edu.cn

陶颖，同济大学城市规划系，工程硕士研究生

潘洁雯，同济大学城市规划系，硕士研究生

肖扬，同济大学城市规划系，高密度人居环境生态与节能教育部重点实验室，副教授，通讯作者，yxiao@tongji.edu.cn

受空间句法的影响，英国Cardiff大学的研究团队研制出sDNA系统 (spatial design network analysis, 空间设计网络分析)，美国麻省理工-新加坡城市形态实验室研制出UNA系统 (urban network analysis, 城市网络分析)，英国Sergio Porta教授团队开发的出MCA工具 (multiple centrality assessment)。

国内有很多学者对空间句法做了应用探讨 (陈晨, 王法辉, 修春亮, 2013; 段进, 邵润青, 兰文龙, 等, 2019; 邵润青, 2010; 杨滔, 2006), 有少量学者使用sDNA, 或者进行方法比较。然而对于街道尺度下不同方法的差异、优势、局限尚未有系统的梳理和解析 (肖扬, A. Chiaradia, 宋小冬, 2014)。本研究针对城市尺度的街道网络, 选取空间句法的Axial Map、Segment Map、sDNA和UNA, 从对象定义、计算方法、常用指标、计算结果以及人流观测拟合结果等多个维度进行系统比较, 希望研究结论对城市空间分析技术的推广、技术实践中的应用提供支持。

2 街道网络定义、算法、指标比较分析

描述网络结构, 最初是数学界, 针对道路系统, 至少有百年以上的历史。大约在1960年代, 在美国出现研究社会网络分析 (social network analysis) 学者群。到了1970年代, 描述社会网络的术语逐渐成型, 尽管后来有改进、变化, 但是关于网络中心位置的术语、计算方法传播到了建筑学界, 产生了空间句法 (space syntax), 术语和计算公式也有所变化, sDNA和UNA是在继承社会网络分析方法基础上, 对空间句法的改进。空间句法传播到国内, 不同学者对计算指标及其术语的翻译略有差异, 为了术语统一, 笔者参考最近出版的社会网络分析中文教学参考书 (杨松, 弗朗西斯卡·B. 凯勒, 郑路, 2019) (表1)。参考社会学的解释, 所谓接近中心度 (对应集成度、接近度), 可理解为容易发生直接联系、容易到达, 所谓中间中心度 (对应选择度、中间度), 可理解

为起到中介联系作用, 容易经过。

2.1 “点—线”定义的差异

图论将网络定义为节点 (node) 和线 (link), 建立拓扑关系, 不同学科在城市街道尺度上, 对“点—线”拓扑关系有不同的定义 (B.Jiang, C.Claramunt, 2002), 如图1所示, 对相同的街道布局, 有不同的定义方式 (a1)、(b1)、(c1)、(d1), 产生不同拓扑关系 (a2)、(b2)、(b3)、(b4), 由此得到的计算结果会有差异。表2基于建模原理、拓扑关系、定义方式、分析对象、数据来源和软件平台进行比较总结, 发现UNA的精细较高, 包涵建筑尺度的信息, 而空间句法和sDNA强调了对偶的拓扑关系。M.Batty (2009) 指出, 经典拓扑 (primal approach) 和对偶拓扑 (dual approach) 都可表示和分析城市街道网络。

2.2 指标概念与算法比较

街道网络分析方法的常用指标、基本原理均出自社会网络分析 (social network analysis, SNA) 方法, 计算公式略有不同。用得最多的是接近度 (closeness, 空间句法称整合度, integration) 和中间度 (betweenness, 空间句法称选择度, choice), 参见表2、表3。

2.2.1 接近度 (closeness) / 整合度 (integration)

接近度表示在搜索半径范围内, 网

络内某点到其余各点的难易程度。

空间句法轴线地图 (axial analysis) 的算法特别之处在于考虑一个钻石形 (diamond-shaped) 拓扑结构来削减所有其他网络的拓扑结构差异, 计算公式如下:

$$Li = \frac{1}{RRAi} = \frac{RA(d)}{RAi} = \frac{2 \{ n [\log_2(((n+2)/3) - 1) + 1] \}}{(n-1)(n-2)} = \frac{2 [MDi - 1]}{(n-2)}$$

$$n [\log_2(((n+2)/3) - 1) + 1]$$

$$(n-1) [MDi - 1]$$

其中: $RA(d)$ —钻石型拓扑结构的相对不对称度;

RAi —系统中结点*i*的相对不对称度;

$RRAi$ —系统中结点*i*的真实不对称度;

n —系统的结点数;

MDi —系统中结点*i*的平均拓扑深度。

$MDi = TDi/(n-1)$, TDi 为系统中结点*i*的总拓扑深度。

表1 社会 (街道) 网络分析术语英汉对照

Tab.1 Translation of terminology in social (street) network analysis

社会网络分析中的全称	空间句法 Axial Map, Segment Map	空间设计网络分析 sDNA	城市网络分析 UNA
closeness centrality 接近中心度	integration 集成度	closeness 接近度	closeness 接近度
betweenness centrality 中间中心度	choice 选择度	betweenness 中间度	betweenness 中间度

资料来源: 作者自绘。

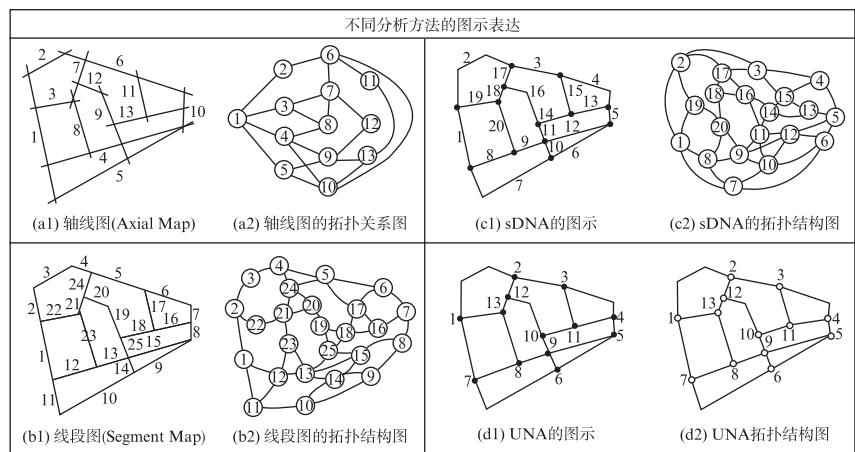


图1 四种分析方法的图示及拓扑关系对比

Fig.1 Diagram and topological relation comparison of four analytical methods

资料来源: 作者总结自绘。

表2 四种分析方法差异的总结对比

Tab.2 Summary and comparison of four analytical methods

	空间句法轴线图 (Axial Map)	空间句法分段图 (Segment Map)	空间设计网络分析 (sDNA)	城市网络分析 (UNA)
网络建模	所见所达	所见所达	道路交通网络	道路交通网络
拓扑关系	对偶拓扑	对偶拓扑,加权	对偶拓扑,加权	经典拓扑
初始定义	视域轴线	视域轴线	一般道路中心线	一般道路中心线
分析对象	道路路段	道路路段	道路路段	建筑物出入口、道路交叉口
数据来源	手绘轴线	手绘轴线	一般电子地图	一般电子地图
软件平台	基于CAD	基于CAD或GIS	基于GIS	基于GIS、Rhino

资料来源:作者自绘。

表3 四种分析方法指标总结对比

Tab.3 Summary and comparison of indicators of four analytical methods

	空间句法轴线图 (Axial Map)	空间句法分段图 (Segment Map)	空间设计网络分析 (sDNA)	城市网络分析 (UNA)
常用指标	整合度(integration)、 选择度(choicce)	整合度(integration)、 选择度(choicce)	接近度(closeness)、 中间度(betweenness)	接近度(closeness)、 中间度(betweenness)
最短路径的 度量	拓扑深度	欧氏距离、角度距离	欧氏距离、角度、自定 义、混合距离	欧氏距离
搜索半径	拓扑深度	网络半径	网络半径	网络半径
空间模式	离散空间	离散空间	离散、连续空间	离散空间

资料来源:作者自绘。

由上式可见空间句法轴线分析的整合度仅与系统中的结点数 (node count) 以及总拓扑深度 (TDi) 有关。

线段分析 (segment analysis) 则提供多种计算方式, 欧氏距离、深度距离以及角度距离的加权, 其中以角度线段分析为主要方法。角度线段分析以转弯的角度为度量, 在360°的转角划分的1 024个区间内取值, 角度深度的取值遵循以下原则: 转角角度<22.5°赋值为0; 转角角度为45°赋值为0.5; 转角角度为90°的赋值为1 (B.Hiller, S.Lida, 2005)。角度线段分析的计算公式为:

$$Ingteration(i) = n/MDi = n/(TDi/n) = n \times n/TDi$$

其中: n —最短路径中所遇到的所有结点数;

MDi —结点*i*的平均角度深度;

TDi —结点*i*的全局角度深度。

sDNA 推荐使用 NQPD (Network Quantity Penalized for Distance) 来度量接近度 (closeness) 指标。计算公式的优势在于同时考虑了网络的质量和数量:

$$NQPD(x) = \sum_{y \in Kx} \frac{P(y)}{d_{\theta}(x,y)}$$

其中: $d_{\theta}(x,y)$ —最短路径距离, 在角度分析中为角度距离;

$P(y)$ —在离散空间中, 若点在搜索半径内, 则为1, 否则为0。在连续空间中, 按照半径与路段的长度比例确定, 在0到1之间。

UNA的接近度 (closeness) 度量为在搜索半径内, 沿着最短路径, 从一个结点 (建筑) 到其他所有结点 (建筑) 的累积距离的倒数。计算公式为:

$$Closeness[i] = \frac{1}{\sum_{j \in G - \{i\}, d[i,j] \leq r} (d[i,j] \cdot W[j])}$$

其中: $Closeness[i]$ —半径*r*范围内的建筑物 (起点) *i*的整合度值;

$d[i,j]$ —结点*i*和*j*之间的最短路径的距离;

$W[j]$ —目的地建筑 (终点) *j*的权重, 当不考虑建筑物输入的时候, $W[j]$ 为1。

2.2.2 中间度 (betweenness) /选择度 (choicce)

中间度 (betweenness) 在空间句法中称为选择度 (choicce), 基本定义为: 图中经过点*v*的任意其他两点*s*、*t*间的最短路径的数量与*s*、*t*之间所有最短路径数量之间的比值, 它度量了街道网络中的路径被选择的频率, 这是一个关于空间流的全局动态指标, 其公式为:

$$B(v) = \sum_{s \neq t \neq v} \frac{\delta st(v)}{\delta st}$$

其中: $B(v)$: 点*v*的中间性;

$\delta st(v)$: 点*s*与*t*之间最短路径经过点*v*的次数;

δst : 点*s*与*t*之间最短路径的条数。按欧氏距离, 对于不规则路网, 两点之间的最短路径一般只有一条, 按角度距离, 对均质网络可能会出现多条。

轴线分析 (axial analysis) 的选择度的分流方式是采取随机原则, 即当有多条最短路径时, 随机选择其中的一条, 忽略其他的路径。角度线段分析的选择度 (T1024 Choice) 计算原则是根据特纳 (A.Turner, 2001) 的定义, 角度线段选择度的“分流”也是按照随机分配的原则进行计算。

sDNA的中间度计算方法和空间句法的线段分析基本一致, 不同之处是sDNA将路段本身也纳入了起点与终点之中, 考虑了路段自身的中间度值。在大多数情况下, sDNA推荐使用最短路径的定义为角度距离 (最少转角角度), 其角度中间性的“分流”计算仅计算首次出现的最短路径的值, 忽略后面出现的其他最短路径。

UNA的中间度采用快速计算原则, “分流”采用平均分配的原则。

2.2.3 搜索半径

搜索半径 (radii metric) 是街道网络分析的重要概念, 主要用于限定参与计算的网路空间范围, 表示了考虑问题的空间尺度。轴线分析模型中的搜索半径以拓扑深度值度量, 线段分析、sDNA和UNA常用欧氏距离作为搜索半径的度量。如图1中的 (b) (c) (d) 所示, 搜索半径以实际的欧氏距离作为限制, 由于经典拓扑和对偶拓扑关系的定义不同, 会导致相同搜索半径下的研究范围存在大小差异 (图2, 图3)。

总体而言, 空间句法的轴线分析、线段分析、UNA仅提供离散空间的计算, sDNA提供离散空间与连续空间两种空间计算模式。离散空间中, 轴线分析搜索半径以拓扑深度值度量, 设定为1时研究范围为道路A、B、C, 设定为2时全部道路纳入研究 (图3a)。线段分析将整个路线的长度都纳入半径, 只要网络半径到达路段则将该路段全部纳入研究范围, sDNA以道路中点为判断标

准，网络半径到达道路中心点才认为是到达该路段，虽然定义标准略有不同，但最终识别出的研究范围基本一致，220m的网络半径下道路A、B、C全部纳入研究范围（图3b、c）。UNA的研究对象为道路交叉点，使得相同半径下包含的路段与线段分析、sDNA不同（图2d）。连续空间的计算相对精确，以实际的半径值框定研究范围，网络半径到达的路段会被剪断，在打断点之内的路段纳入研究范围（图3），连续空间模式下sDNA的搜索半径限定的范围与线段分析的不同。

3 街道网络计算结果比较分析

3.1 指标计算差异比较

如图4所示，基于理想路网2.5km×2.5km的均质方格网，路网间距为500m，通过比较4种网络分析方法全局和局部（600m和1200m）的计算结果探索各方法的特性（图5，图6）：

(1) 全局计算与局部计算的横向差异。我们发现UNA的局部接近度呈现局部与全局计算相反的结果，这是由于算法的定义为距离的倒数，局部计算时的边缘的计算距离减小，接近度反而变大。如2.2部分所述，由于各方法计算中间度的分流原则不同，其结果较易出现不一致的情况。设置较小搜索半径，会出现失效问题，这是由于没有考虑结点本身的选择度，当搜索半径定义未超

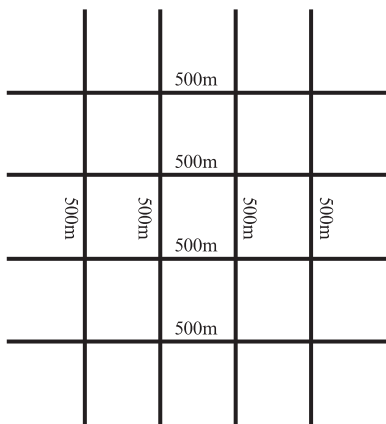


图4 用于实验的理想路网
Fig.4 Ideal road network for experiment
资料来源：作者自绘。

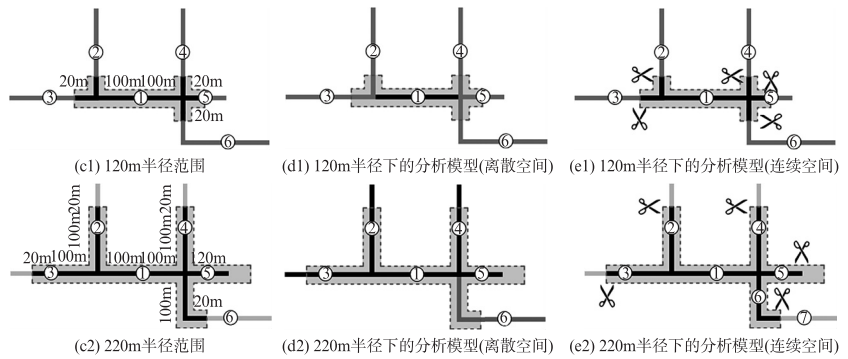


图2 不同方法的搜索半径定义
Fig.2 Definition of radii metric for different methods
资料来源：作者总结自绘。

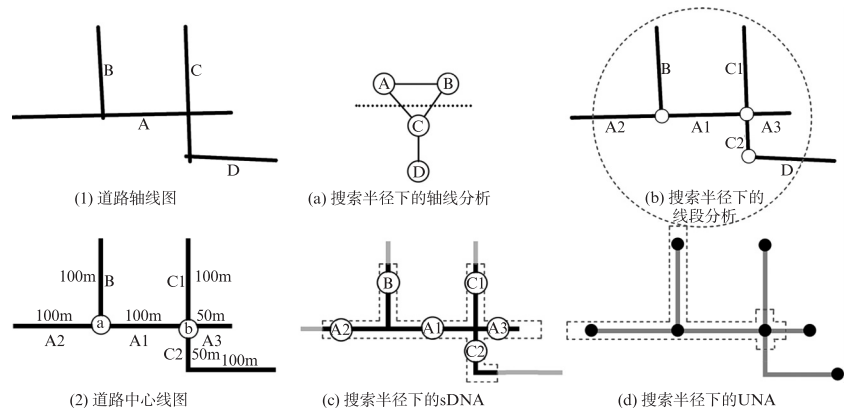


图3 不同空间模式的搜索半径定义
Fig.3 Definition of radii metric in different spatial patterns
资料来源：作者总结自绘。

出一个结点时，会出现计算结果为0，即分析失效。

(2) 不同方法间的纵向差异。发现全局计算下的轴线分析、角度线段分析、sDNA的接近度/空间句法整合度趋于一致，而UNA的接近度呈现中心高四周低，这是由于前三者采用角度及深度作为计算度量，而UNA采用欧氏距离作为计算度量。搜索半径限定下的角度线段分析与sDNA的接近度一致，表现出较好的稳定性。关于中间度方面，无论是全局还是局部计算，四种方法的选择度均呈现不一致状态，这是由于四种方法对于选择度的“分流”原则及起点结点是否纳入计算等的定义各不相同。由于分流的随机原则，意味着相同数据，不同用户的分析结果可能存在不一致。

(3) 搜索半径的设定差异。地理空间无明显边界，大部分的分析都需要人为选定分析范围。在引入搜索半径后，

边缘的结点由于人为地打断，丢失了分析范围之外的连接，使得分析网络边缘结点向外搜索的范围受限，这些边缘路段的接近度和中间度的结果失效，可称之为边缘效应、边缘失效。因此，在选择分析范围的时候需要考虑到搜索半径大小对分析结果的影响。

3.2 人流数据拟合差异比较

A.Turner (2007) 对现场观察到的车辆数做拟合分析，发现空间句法中的角度线段分析法拟合效果存在一定优势。为了系统比较DepthMap、sDNA、UNA三种分析工具的优势和差异性，本环节采用“network and psychological effects in urban movement” (B.Hillier, S. lida, 2005) 一文中提供的开源数据为基础，选取其中的英国伦敦Barnsbury街区的街道网络及观测到的人流数据作为实验对象（图7），通过400m、800m、

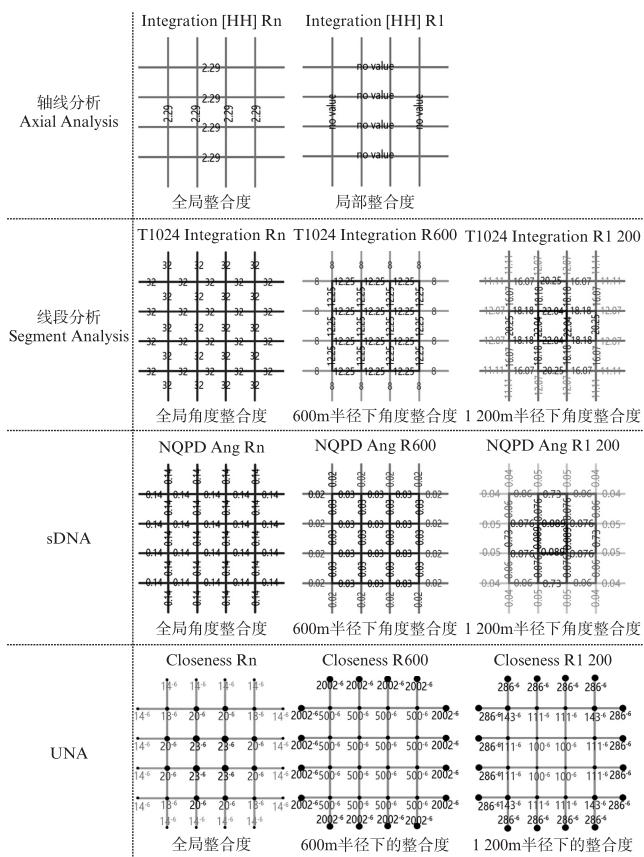


图5 不同方法的接近度计算结果比较

Fig.5 Comparison of the calculation results of the integration/closeness of different methods
资料来源：作者自绘。

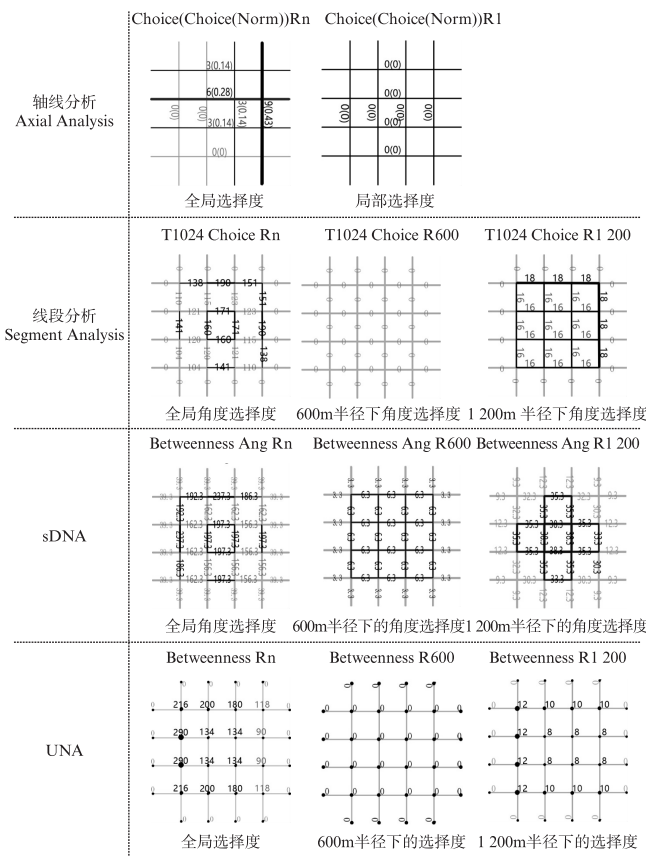


图6 不同方法的中间度计算结果比较

Fig.6 Comparison of the calculation results of the betweenness/choice of different methods
资料来源：作者自绘。

1 200m三个搜索半径下的分别计算和拟合分析，分析比较各网络分析方法的差异性。

由于篇幅所限，研究直接对人流数据收集点的指标值与不同指标值进行相关性检验分析（表4），以赤池信息量准则（Akaike information criterion，简称AIC）判别人流数据与不同指标的拟合度的优劣。通常AIC比调整后的线性相关R²更加准确，AIC值越小拟合效果越好。研究发现以下三点。

（1）搜索半径的选择对拟合效果影响较大。随着搜索半径的变化，空间句法、sDNA、UNA 3种分析方法的拟合度呈现出不同程度的浮动，仅有空间句法的轴线分析和线段分析的指标拟合度变化趋势是相同。3种方法的接近度和中间度与人流的拟合度同时在800m的搜索半径下取得峰值，原因可能与人流的研究范围有关。

（2）相比接近度（整合度），中间度（选择度）对人流数据的拟合度更优。总体而言，三种分析方法在各半径尺度下均显示中间度（选择度）拟合得更好。说明用中间度预测人流活动具有一定的稳健性，但不等于网络接近度与人流活动无关。

（3）对于Barnsbury街区案例而言，不论各种尺度，sDNA的指标拟合度均呈现最优，而UNA的拟合度最差。此外对比空间句法的轴线分析和线段分析，结果显示轴线分析与行人步行活动的拟合度更高，但是不能简单认为空间句法线段分析的可预测性较差。

4 总结与讨论

本研究选取空间句法的轴线分析和线段分析、sDNA和UNA四种网络分析方法，在从其定义、算法、指标、计算

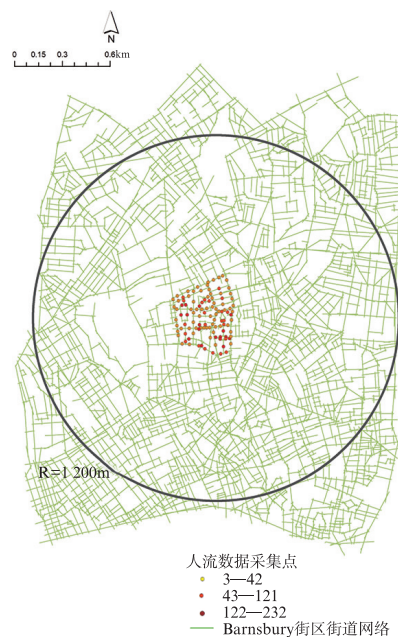


图7 Barnsbury街区街道网络和人流分布观察
Fig.7 Observation of the distribution of street network and human flow in Barnsbury block
资料来源：作者自绘。

表4 四种分析方法与人流数据拟合度分析

Tab.4 Fitting analysis of four analytical methods and human flow data

搜索半径 (m)	统计检验	城市网络分析(UNA)		空间设计网络分析(sDNA)		空间句法轴线分析(Axial Map)		空间句法分段分析(Segment Map)	
		Closeness	Betweenness	NQPDA	BtA	T1024_INTE	T1024_CHOI	T1024_INTE	T1024_CHOI
400	adjustR2	-0.007 7	0.149 5	0.109 8	0.300 6	0.158 3	0.250 2	0.161 9	0.245 4
	AIC	1 199.799	1 181.322	1 187.305	1 159.998	1 180.18	1 167.579	1 179.716	1 168.282
800	adjustR2	0.011 0	0.200 2	0.118 5	0.383 7	0.097 7	0.370 4	0.097 6	0.366 6
	AIC	1 197.76	1 174.615	1 185.216	1 146.207	1 187.762	1 148.536	1 187.768	1 149.2
1 200	adjustR2	0.016 6	0.236 7	0.380 8	0.344 2	0.130 5	0.341 5	0.132 3	0.340 7
	AIC	1 197.147	1 187.716	1 146.726	1 152.975	1 183.727	1 153.422	1 183.499	1 153.569

资料来源：作者自绘。

结果、人流拟合等多个维度进行系统比较分析。

首先，研究发现四种网络分析方法虽然研究对象和理论框架的原型很接近，但定义方式、核心算法不同，计算结果存在显著差异。空间句法呈现出从建筑尺度向城市尺度的发展趋势，而sDNA更加强调的是城市尺度下对偶拓扑与城市交通网络的整合和协同性。UNA因选用经典拓扑，针对街道网络时，考虑建筑物的出入口和建筑物的属性，例如使用功能和建筑面积等，因此在理论上计算精确性较高，并能更好地模拟人的活动。需要说明的是理论上UNA方法对数据基础要求较高，比较适合应用于开放社区。此外研究发现对于空间句法的整合度计算结果，由于“分流”自身的随机性，会导致相同的网络结构对象出现不同的分析结果。

此外，研究发现搜索半径的选取对研究分析结果影响较大。搜索半径小于路段长度，会带来中心性计算失效的问题，同时搜索半径的限定会使得边缘路段出现边界失效问题。因此，在限定计算范围，应考虑搜索半径、空间尺度，避免分析结果的偏差。

在Barnsbury街区案例的人流拟合分析中，尽管sDNA方法显示最优，但由于没有建筑物数据，UNA的优势无法展现。C.Ratti (2004)曾经质疑空间句法的轴线图在分析、预测人流时会和常理不一致，但本实验发现欧氏距离的线段地图、轴线分析，计算结果和行人步行活动的拟合度更好。因此建议在积累实践经验的基础上，合理使用不同方法，发挥各自的优势。

参考文献 (References)

[1] BATTY M, LONGLEY P. Fractal cities: a geometry of form and function[M]. Academic Press, 1994.

[2] BATTY M. Accessibility: in search of a unified theory[M]. UK London, England: SAGE Publications Sage, 2009.

[3] 陈晨, 王法辉, 修春亮. 长春市商业网点空间分布与交通网络中心性关系研究[J]. 经济地理, 2013, 33(10): 40-47. (CHEN Chen, WANG Fahui, XIU Chunliang. The relationship between the spatial distribution of commercial networks and street centrality in Changchun[J]. Economic Geography, 2013, 33(10): 40-47.)

[4] 段进, 邵润青, 兰文龙, 等. 空间基因[J]. 城市规划, 2019, 43(2): 14-21. (DUAN Jin, SHAO Runqing, LAN Wenlong, et al. Space gene[J]. City Planning Review, 2019, 43(2): 14-21.)

[5] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space[M]. Cambridge University Press, 1989.

[6] HILLIER B, LIDA S. Network and psychological effects in urban movement[C]. International Conference on Spatial Information Theory, 2005.

[7] JIANG B, CLARAMUNT C. Integration of space syntax into GIS: new perspectives for urban morphology[J]. Transactions in GIS, 2002, 6(3): 295-309.

[8] 李涛, 程遥, 张伊娜, 等. 城市网络研究的理论、方法与实践[J]. 城市规划学刊, 2017(6): 43-49. (LI Tao, CHENG Yao, ZHANG Yina, et al. Theories, methods and practices of city network analysis[J]. Urban Planning Forum, 2017(6): 43-49.)

[9] MARCUS L, GIUSTI M, BARTHEL S. Cognitive affordances in sustainable urbanism: contributions of space syntax and spatial cognition[J]. Journal of Urban Design, 2016, 21(4): 439-452.

[10] RATTI C. Space syntax: some inconsistencies[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2004, 31(4): 487-499.

[11] 邵润青. 空间句法轴线地图在方格路网城市应用中的空间单元分割方法改进[J]. 国际城市规划, 2010(2): 62-67. (SHAO Runqing. A new space partition method of axial map in regularly gridded urban texture[J]. Urban Planning International, 2010(2): 62-67.)

[12] TURNER A. Depthmap: a program to perform visibility graph analysis[C]//Proceedings of the 3rd International Symposium on Space Syntax, 2001.

[13] TURNER A. From axial to road-centre lines: a new representation for space syntax and a new model of route choice for transport network analysis[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2007, 34(3), 539-555.

[14] WILSON A G. Complex spatial systems: the modelling foundations of urban and regional analysis[M]. Routledge, 2014.

[15] 肖扬, Alain Chiaradia, 宋小冬. 空间句法在城市规划中应用的局限性及改善和扩展途径[J]. 城市规划学刊, 2014(5): 32-38. (XIAO Yang, CHIARADIA A, SONG Xiaodong. A discussions on implementing space syntax method in urban planning[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 32-38.)

[16] 杨松, 弗朗西斯卡·B. 凯勒, 郑路. 社会网络分析: 方法与应用[M]. 曹立坤, 曾丰又, 译. 社会科学文献出版社, 2019. (YANG Song, KELLER F B, ZHENG Lu. Social network analysis: methods and applications[M]. CAO Likun, ZENG Fengyou, translate. Social Science Literature Press, 2019.)

[17] 杨滔. 空间句法: 从图论的角度看中微观城市形态[J]. 国外城市规划, 2006, 21(3): 48-52. (YANG Tao. Space syntax: meso- and micro-urban morphology under the view of graph theory[J]. Urban Planning Overseas, 2006, 21(3): 48-52.)

修回：2020-02