

多尺度城市空间网络研究进展与展望

The Progress and Prospect of the Multi-scale Urban Space Network Research

侯静轩 张恩嘉 龙瀛
Hou Jingxuan, Zhang Enjia, Long Ying

摘要: 目前越来越多的城市研究者开始以网络科学的视角研究城市空间。本研究通过梳理已有城市空间网络研究, 将相关研究分为区域、城市与入本三个研究尺度, 并分析了“尺度”这一网络研究中的重要元素在研究方法与研究内容方面产生的作用与影响。研究方法方面, 所研究空间尺度越大, 网络化过程中对空间的抽象程度越高, 越侧重于测度网络整体特征; 所研究空间尺度越小, 使用的空间模型则越精细, 常聚焦于分析节点在网络中的地位。研究内容方面, 较大尺度研究中针对的流类型更多且涉及动态网络研究, 但主要倾向于刻画网络现象; 而较小尺度研究中已较多开展流网络与空间网络作用方式的研究。此外, 本文展望了未来多尺度城市空间网络研究可能的研究方法与研究内容, 试图挖掘网络科学视角下多尺度城市研究的机遇, 从而为城市研究提供新的视角和参考。

Abstract: Recently, there are a growing number of scholars studying cities from the perspective of networks. This research reviews exiting studies by dividing them into three categories to reveal the spatial scale effects on study methods and contents of urban spatial networks. From the perspective of the study method, researchers prefer the highly abstract spatial network and measuring the fundamental characteristics of the network for large-scale studies. In contrast, the fine spatial model is usually applied at fine-scale explorations to reveal some nodes' roles in the whole network. As for the study focus, various types of flows and their dynamics are depicted to interpret some spatial phenomena at larger scales, and the interaction between flow and spatial network is the main theme in fine-scale studies. Moreover, this paper tries to show the opportunities of the future multi-scale urban research by prospecting its possible analytic methods and contents, and to provide a new perspective and reference for urban studies.

关键词: 网络科学; 尺度; 空间分析; 空间网络; 流网络; 二分网络; 流类型

Keywords: Network Science; Scale; Spatial Analysis; Spatial Network; Flow Network; Bipartite Networks; Flow Type

作者: 侯静轩, 清华大学建筑学院, 博士研究生。houjx19@mails.tsinghua.edu.cn
张恩嘉, 清华大学建筑学院, 博士研究生。zej18@mails.tsinghua.edu.cn
龙瀛, 清华大学建筑学院、清华大学恒隆房地产研究中心, 研究员、博士生导师; 中国城市规划学会城市规划新技术应用学术委员会, 副主任委员。ylong@tsinghua.edu.cn

1 城市的网络现象与城市空间研究的尺度

1.1 城市空间网络研究概述

自卡斯特 (Castells) 将城市空间定义为“流空间”以来^[1], 越来越多的城市研究者开始将城市视为相互作用、沟通的整体以及流和网络的集合, 而非仅将城市空间中的位置信息和空间的具体情况作为其最重要的属性^[2]。巴蒂 (Batty) 把这种将区位视为相互作用结果的科学定义为“新城市科学” (The New Science of Cities), 用以强调“城市的本质是不同个体在时间和空间维度的相互作用”^[2]。由于空间被视为相互作用 (如人流、物流、信息流等) 的集合体, 因此要深入研究城市, 就需要了解构成城市系统的对象之间的互动与流动关系^[3-4]。近年来, 越来越多的研究证明许多城市现象本质上是网络现象^[5-6], 例如城市的等级规模^[7,8]、韧性^[9-10]、集聚或规模效益^[11]等。以此为契机, 致力于分析互动和流动的“网络科学”

(Network Science) 被引入城市空间研究中, 并形成了与之相对应的网络分析方法。

而自“分形” (fractal) 的概念被提出并纳入复杂性科学的核心概念以来^[12], 人们越来越倾向于将城市视为一种分形结构, 它具有在不同尺度范围内不断重复自身结构特征的属性。但城市作为一种较为独特的复杂性系统, 存在着“多即是异” (more is different)^[13]的特性, 导致不同尺度的城市系统中严格的自相似性较为罕见^[14]。因此, 作为具有分形特征的流的载体, 城市既衔接不同尺度的相同要素 (如人流、物流、资金流等), 又影响不同尺度下人的活动情况, 使得城市现象在不同尺度的约束下既体现出一定的共性, 又表现出差异。此外对于城市设计、规划者和研究者而言, 尺度在城市发展以及空间形态设计的过程中亦发挥着重要作用^[15]。不同尺度中

城市空间的共性与差异性由此成为网络研究这一复杂性研究子领域下重要的研究课题^[16]。

目前已有的城市空间网络研究中,虽有从理论^[17]、内容^[18]、方法和数据^[19]等方面对城市网络或流空间的研究进展进行综述,但尚缺乏对不同尺度下城市空间网络研究异同的系统性分析,导致城市作为分形系统所表现出的尺度共性和差异尚不清晰,尺度在城市研究中发挥的作用仍较模糊。基于此背景,本研究以尺度为重点,整理和比较已有的城市空间网络研究,旨在梳理不同尺度城市空间网络研究方法与研究内容的共性和特性,并尝试揭示尺度对城市网络现象研究的影响规律,以期在城市空间研究提供新的视角和参考。

1.2 城市空间网络研究的尺度

近年来,越来越多的学者开始从网络和流动的角度展开对城市这一复杂性系统的研究。在网络科学的视角下,城市的特征是由其中的基本单元之间的相互作用产生的,因此相关研究通常围绕相互作用的主体(即节点)与主体间的联系(即链接)展开,并将实际空间提炼为由此二者构成的网络,此过程被称为“空间的网络化”。如新通、京沈高铁路网可抽象为以高铁站点为节点、高铁线路为链接的网络,而北京地铁线路(局部1)可抽象为以地铁站点为节点、地铁线路为链接的网络(图1)。网络化后的空间能用

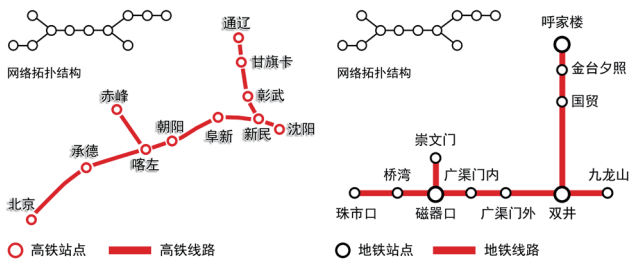


图1 新通、京沈高铁路网(左)与北京地铁线路(局部1)(右)的拓扑网络结构图

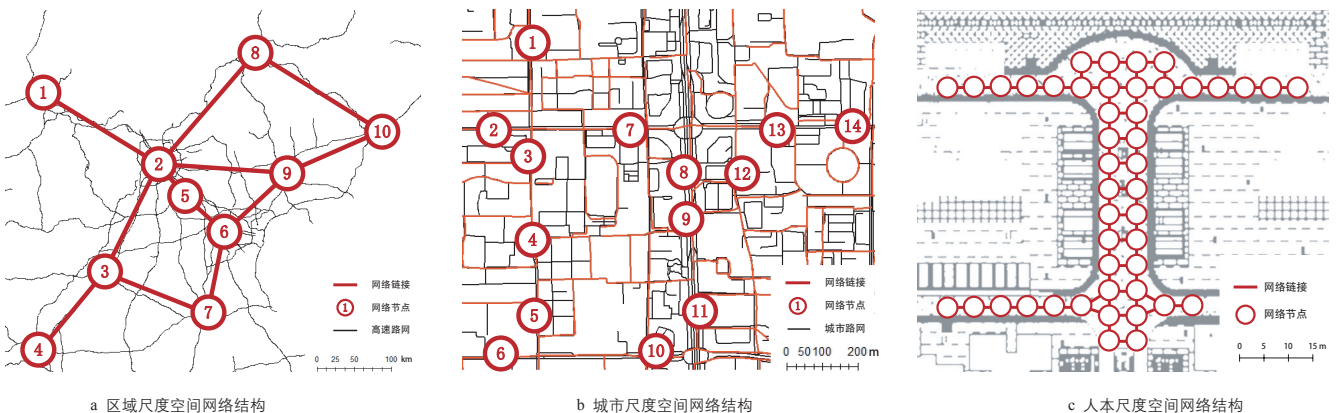


图2 区域、城市与人本尺度城市空间网络结构示例

于分析不同系统间存在的内在一致性,如新通、京沈高铁路网和北京地铁线路(局部1)网络便具有相同的拓扑网络结构。

目前采用网络分析方法的城市空间研究范围既可以是城市尺度,也可以是更大尺度(如国土空间、区域范围内的城市空间),以及较小尺度(如城市内部街区),甚至更细微的尺度(如城市公共空间等)^[21]。根据已有研究在空间网络化过程中对物理空间抽象程度的差异,可将城市空间网络研究分为区域、城市、人本三个尺度^[22]。区域尺度研究指针对大都市区、城市群或城市圈等多个城市组成的空间系统的研究,特点是将城市抽象为点(即网络节点),以分析城市间的相互作用关系。区域尺度研究中应用的网络模型往往是基于城市的直接连接,其链接关系通常较为简单,如将城市间复杂的公路、铁路系统抽象为单线(即网络链接)

(图2a)。城市尺度研究指将某城市或其中某部分空间作为分析范围的研究,特点是将城市空间分解为多个子区域并将各子区域视为网络节点,以研究不同网络节点之间的关系。城市尺度研究通常将城市空间抽象为与道路网高度重合的网络进行分析,其网络链接与道路在位置和数量上均有较大一致性(图2b)。人本尺度研究针对的是“人本尺度城市空间”,即人们可视可感的、与人体联系紧密的城市空间,如广场、公园绿地和居住小区公共空间等^[23],其尺度往往小于街区和地块,能够对城市研究的深度和细致程度进行有效补充。人本尺度研究通常对网络模型的空间精度要求较高,如将被研究的某公共空间划分为米级等大栅格,并以此作为网络节点,以栅格间的连通关系为网络链接(图2c)。

2 多尺度城市空间网络研究方法进展

2.1 城市空间多层网络耦合方法

城市现象往往是由不同的城市系统间互相耦合、相互作用产生的,因此城市空间网络研究常进行多层网络的

研究^[24-25],其中采用最多的是将城市视为“流网络”与“空间网络”构成的“二分网络”分析方法^[26]。城市空间网络研究将人流、物流、信息流、资金流等流动的传递视为城市现象形成的基础,其呈现的起终点关系构成了“流网络”。城市研究通常用其汇总的结果数值来反映某一时段网络节点的属性变化,例如:区域尺度研究中各城市的人口变化,城市尺度研究中各主要商场的营业额,以及人本尺度研究中公共空间各节点的日均使用人数等。为了对“流网络”所呈现的结果进行分析,城市空间网络研究引入了对“流”的流动产生影响和限制的道路网、铁路网、管网等物理空间网络概念,称为“空间网络”。相关研究如区域尺度通过分析高铁网络的变化研究城市人口变化,城市尺度研究新增地铁站点与商场营业额消长的关系^[27],以及人本尺度分析空间形态对流线选择方式的影响^[23]等,都是用空间网络分析流网络的结果。

因此,梳理流网络与空间网络的耦合关系在城市空间网络研究中尤为重要^[28-30]。以北京地铁线路(局部2)为例(图3),可采用网络分析的视角将地铁线路图(局部2)(图3a)抽象为由站点(字母A-G)和站点间线路段(数字1-8)构成的二分网络(图3b)。其中地铁线路段作为空间网络,是实际交通人流的承载者,而各站点的进出站人流量是各站点所组成的流网络的属性。网络分析中,将地铁线路的网络结构(图3c)视为人流量在各线路段上分布的主要影响因素,并通过线路网络与站点网络间的耦合关系将人流传递到站点网络中(图3d),从而影响流网络的属性。已有的区域尺度研究中多将流网络与物理上相连或相近的空间网络节点直接耦合,而城市与人本尺度研究中则会更多考虑加权计算等更为复杂且准确的耦合方式以反映空间网络对流网络的影响,如赋予较近的空间网络节点较高的权重,从而加权计算空间网络节点的可达性。

2.2 城市空间网络属性测度方法

城市空间网络分析的重点之一是通过测度网络的属性解释城市现象,其主要方法为网络分析法(network analysis),可测度四类城市网络属性。第一是测度网络中单个节点在整个网络中的地位,主要用于测度城市群中某城市的地位与重要性,或评估城市内某功能区在城市中的作用。如衡量某城市在某区域内的核心程度^[31],研究城市在区域中的角色(枢纽型、输出型或输入型城市,大城市周边小城市等),测度城市的吸引力和等级^[32-33],判断城市内部城镇体系结构或各功能节点的中心性及其在城市中的作用^[34],常使用度数(度中心度)、接近中心度、中介中心度和特征向量中心性等测度方法。第二是衡量节点之间的关系,主要用于识别城市群中城市的关系与联系强度,或判断城市某功能区的内部结构,如测度城市群内各城市的点轴关系以衡量城市群的多中心与单中心特征^[35],比较不同城市之间的联系强度^[36-37],识别实体城市的范围或识别城市某功能区(如景区、公园、小区等)内部的结构^[38],常使用任意两节点间的连接情况及权重、最短路径、最短/最长距离及集聚系数等测度方法。第三是刻画网络的整体特征,用于对比不同城市群组成的网络系统的整体属性,如比较城市群系统中不同流或网络的结构差异^[39],常使用度分布、平均集聚系数、链接密度(网络密度)、平均度、平均路径长度、连通性、网络直径等测度方法。第四是根据网络中节点的连接情况对节点进行聚类,主要用于识别城市群内的子群或城市内部的空间子区域,如识别城市群或城市群内子网络及其内部结构或城市内子区域^[40-41],常使用图划分、社区识别(凝聚子群)以及核心边缘分析等测度方法。对于测度单个节点在整个网络中的地位,区域、城市与人本尺度研究中均有所涉及,而测度节点之间的关系与节点聚类主要出现在区域和城市尺度研究中,网络整体特征的分析则多出现在区域尺度研究中。

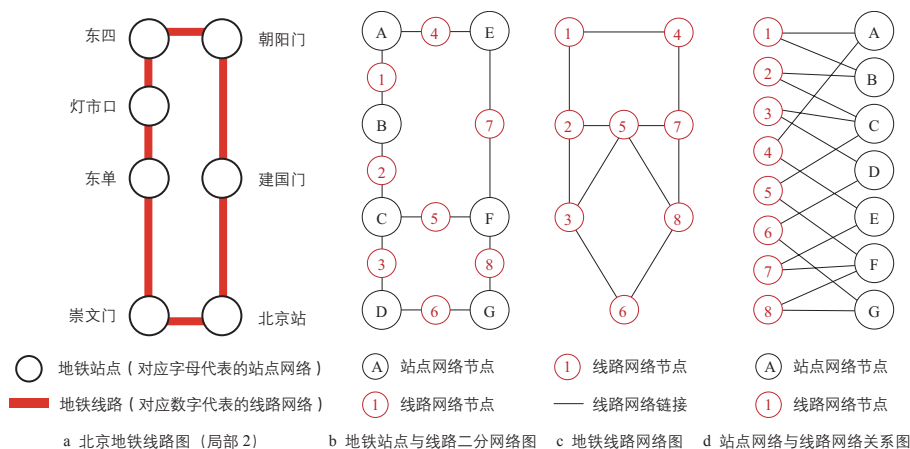


图3 北京地铁线路(局部2)的流网络与空间网络耦合关系研究示例

此外,测度网络属性所用的模型与度量网络属性的量纲也会影响测度结果,故不同尺度研究中采用的模型和量纲也有所不同。目前用于分析网络属性的模型按照度量的量纲可分为拓扑模型、角度模型和以栅格为分析单元的距离模型三种^[42-43]。其中拓扑模型对空间有较大的简化,因此主要用于区域尺度的研究,如模拟城市规划实施对城市交通的影响^[44],通过分析空间结构和社会经济活动的关系提出以优化空间结构促进社会经济活动的方法^[45]。角度模型对城市内人流量的模拟具有较高的准确度,因此是城市尺度空间网络研究中采用最广泛的模型,如研究城市道路网络与地铁网络的耦合关系对地铁流量的影响^[27];也可用于区域尺度与人本尺度研究,如进行人本尺度中街道空间人流量的模拟与分析^[46]。距离模型的使用条件较为特殊,一般仅用于基于栅格化空间的网络分析,如模拟人的视觉认知情况,通常用于人本尺度中步行行为的空间机制研究^[47],在城市尺度或区域尺度中的应用较少。

3 多尺度城市空间网络研究内容进展

不同尺度的城市空间网络研究的内容因尺度不同而有一定的区别,例如区域尺度研究可涉及全球化与全球性城市^[21]、城市群/圈等级结构^[48-49]等;城市尺度研究可开展基于交通起讫点数据的城市功能区识别^[50-51]、城乡网络关系^[52]、空间结构与功能区相互作用分析^[53]、职住关系^[54]、流与交往空间^[55]等研究;人本尺度研究则可研究小区、街道、公园等城市空间的环境行为^[56-57]。

3.1 多尺度的网络类型研究

除去因研究尺度自身特性而产生的不同,多尺度城市空间网络研究往往具有一定的相似性,其中最主要的共性是一般都将城市视为流网络与空间网络构成的二分网络。因此按照研究内容的重点,已有研究可被分为以下三种类型:

(1) 流网络结构研究,以刻画和揭示流网络的特征为主要研究目的,如识别和划分城市某功能的等级与规模,并以此为依据刻画城市功能的集聚与中心的分布^[58-59]; (2) 空间网络结构研究,多以分析人流、物流或信息流在空间网络中流量分布的规律为研究目的,如分析城市群间高铁截面流量的分布规律^[60]; (3) 流网络与空间网络的相互作用方式研究,如研究城市空间网络的属性对流网络结构产生的影响^[55]。

已有研究显示,不同尺度在网络类型方面的研究侧重点有所区别。一方面,尺度越小,城市空间可改变的可能性越高,因此对流网络与空间网络的相互作用方式的研究越多;另一方面,尺度越大,越难获取空间网络结构中流量的数据,因

而研究更偏向进行流网络结构分析,以识别网络现象为主。

在流网络结构的研究中,区域和城市尺度研究偏好于对城市之间或城市内部的等级和规模效应进行研究,如通过分析城市之间的网络识别不同等级和规模的城市在空间中的分布模式^[61-62];而人本尺度研究则主要对空间各部分流分布的差异进行分析^[63]。在空间网络结构的研究中,三种尺度均以研究空间网络中流量分布的规律为主,如区域尺度关注不同城市节点之间的连接所构成的物质或信息网络的结构^[64],城市尺度主要为城市内部流量运输的规律研究^[65],人本尺度则聚焦于某空间内部的流量分布^[66]。在流网络与空间网络的相互作用方式的研究中,区域尺度研究偏好分析空间网络之外的其他因素,如政策等对流网络的作用^[67],而城市与人本尺度则以精细化分析空间网络结构与流网络结果的相互作用关系为主。

3.2 多尺度的网络状态研究

多尺度城市空间网络研究亦可按照网络状态特征划分为静态与动态的研究。研究尺度越大,所涉及动态研究越多,而研究尺度越小,所涉及静态研究越多。区域尺度上对流网络结构和空间网络结构的研究均包含涉及网络变化的动态研究,如流网络结构研究是通过分析区域内城市群的某种网络演化规律预测未来变化趋势^[68-71],空间网络结构研究则是通过研究演化方式解释现有空间网络结构的形成^[60];城市尺度研究中,动态网络分析主要体现在少量的空间网络结构研究中^[27];人本尺度研究则以静态网络研究为主。相比于城市尺度和人本尺度,区域尺度方面可开展更多动态研究。这是由于城市网络中新增节点基本仅与城市边缘的节点相连,且城市内部节点之间难以产生新的连接,致使不同时期网络的变化主要体现在规模的生长上,而非结构的改变,从而增强了区域尺度研究的可行性。

3.3 多尺度的流类型及数据研究

不同研究中所分析的流类型主要包含人流、物流和信息流(如网络信息检索、线上消费)等,采用的数据指征也有所不同,如使用投资起终点数据刻画城市间投资流动情况^[64],使用百度指数等反映不同城市间人们的搜索与认知所产生的信息交换^[67]等。

在流类型方面,三种尺度均以人流研究为主,数据指征如下:区域尺度研究使用的数据既包括传统的基于客运系统上下车位置的客运数据、人口普查结果、移民流量统计等^[72-73],也包括新数据环境产生的数据,如手机信令数据和出行应用中产生的旅游起终点数据^[74-75];城市尺度研究则可以通过社交媒体、手机信令和轨交进出站数据等更多数

据来源分析人流的分布^[76-78]；人本尺度研究中，传统数据和基于移动互联网定位的数据均不能完全满足研究对空间与时间颗粒度的需求^[23,63]，因此近年来相关研究广泛采用新方法获取人流数据，包括使用无人机、摄像头等收集视频数据^[47]，设置 Wi-Fi 探针数据获取手机定位信息^[43]，基于可穿戴设备收集 GPS 数据^[80]和蓝牙数据^[66,81]等。除人流外，信息流也是区域和城市尺度研究分析的流类型^[82-83]，其数据指征多为新数据环境产生的数据^[85-86]，可以与人流相结合^[84]。物流是三种流类型中较少被研究的，在已有研究中主要出现于区域尺度进行货物贸易的相关分析^[87-89]。一方面是因为物流数据相比人流和信息流数据保密性更高，不易获取；另一方面是因为物流过程通常同时产生人流活动，其部分研究内容已被人流研究所覆盖，因而专门的物流研究相对较少。总体而言，多尺度城市空间网络研究中对人流研究最为充分，对信息流的研究次之，而对物流的研究较少，但目前对信息流的相关研究正快速增加（表 1）。

4 城市空间网络的未来研究展望

4.1 研究方法展望

目前已有的城市空间网络研究已形成空间网络化、流网络与空间网络耦合和网络属性测度等方面系统的方法论，但在未来的研究中仍有发展的空间。

首先在空间网络化方面，不同研究尺度对城市物理空间的抽象程度有所区别，可采用不同的模型以提高模拟的准确

度。例如：现在的区域尺度研究以拓扑模型和基于欧式距离的引力模型为主，若在未来的研究中使用城市与人本尺度研究常采用的角度模型或距离模型，将能够更深入地揭示城市中网络现象的规律性。

其次在多层网络耦合方法方面，区域尺度研究可借鉴城市和人本尺度研究中对空间范围和相邻节点影响的考虑，更多尝试流网络与空间网络耦合方式，拓展二者关系的研究。

此外在城市空间网络测度方法方面，目前在城市和人本尺度研究中，测度节点在网络中地位的算法较为多元且准确度较高，未来可将其引入区域尺度研究中。衡量节点之间的关系，在既有研究中多用于研究城市间流的特征，未来还可应用于研究城市内部；刻画网络的整体特征，目前多用于比较不同城市群的结构特征，未来还可用于比较不同城市尺度内部的城市不同片区或人本尺度的不同公园/小区等子系统的结构特征；根据网络中节点的连接情况对节点进行聚类，不仅可用于目前对已有的城市群识别，未来还可用于对城市内部不同功能区，甚至某小区或公园内部可能存在的子区域识别。

总体而言，多尺度空间网络研究方法的发展可能出现两种趋势：一是在大尺度研究中更多地采用中小尺度研究中使用较多的、更为准确的空间网络化与网络测度方法，以提升研究的准确性；二是在中小尺度研究中增加大尺度研究中使用更多的分区域研究与分区域对比方法，对研究对象进行细分，而非仅分析研究对象内部的共性。

表 1 多尺度城市空间网络研究内容

研究尺度	网络类型	网络状态	流类型	代表性研究
区域尺度	流网络结构	动态	人流	国际移民人口流动预测 ^[68-70]
		静态	人流	通过分析城市群中社会经济属性的等级规模对多中心性进行解释 ^[61-62]
	信息流		使用百度指数结合交通流量刻画城市网络结构 ^[86]	
	空间网络结构	动态	人流	高铁网络对城市群形成的作用机制 ^[60]
		静态	物流	国际物流系统对城市群形成的作用机制 ^[89]
	前两者作用方式		静态	人流
信息流		政策对城市网络系统中投资流的影响 ^[67]		
城市尺度	流网络结构	静态	信息流	国际贸易网络流分布 ^[87-89]
			人流	使用社交媒体数据刻画网络结构方法 ^[77]
	空间网络结构	动态	人流	城市内部旅游流网络结构特征 ^[34]
		静态	人流	地铁的增设对空间网络结构的影响 ^[27]
	前两者作用方式	静态	人流	轨交系统中的空间网络结构研究 ^[76]
			信息流	以社交媒体数据作为指征分析人流量 ^[84]
人本尺度	流网络结构	静态	信息流	从线上订单等角度探索流的空间倾向 ^[85]
			人流	旅游游憩空间中游客流量的网络结构分析 ^[23]
	空间网络结构	动态	人流	不同空间设置下的集会人流运动模拟 ^[66]
		静态	人流	距离模型不同参数选择下步行流量模拟精度研究 ^[47]
	前两者作用方式	静态	人流	步行行为受空间认知影响分析 ^[80]
			信息流	

4.2 研究内容展望

网络类型方面,已有的三种尺度城市空间网络研究均包含流网络结构、空间网络结构和流网络与空间网络的相互作用方式三类。流网络结构研究中,区域尺度研究涉及流的流向的研究较多,而城市和人本尺度的相关研究较少。若将流向因素更多地纳入流网络结构研究中,将为城市和人本尺度研究带来更多的研究机遇。空间网络结构研究中,目前研究对城市和人本尺度的空间网络分析更为细致,对区域尺度的道路、铁路等网络研究还可进一步深化。此外在未来研究中可增加对不同尺度网络或同一尺度内不同网络之间的比较分析。相互作用方式研究中,区域尺度的研究往往会关注非空间因素,如某政策对城市网络和流的影响;而城市与人本尺度研究则侧重于分析空间网络结构对流网络的影响,如将道路网络看作影响可达性的重要指标,从而研究可达性对城市经济社会表征的影响。未来区域尺度研究与城市和人本尺度研究可以相互借鉴,如在区域尺度中增加精细模型以分析空间网络结构对流网络结构的影响,以及将其他非空间因素加入城市和人本尺度的作用方式研究中。此外,相比于城市和区域尺度,人本尺度研究中流网络与空间网络的相互作用方式更加复杂,因此可引入更多的影响因素,以进一步提升对城市网络现象的解释程度。

网络状态方面,受网络演化方式的限制,目前动态时间分析主要为区域尺度研究所采用,但随着科技革命和社会经济发展对人们生活方式的改变,城市空间的使用方式也会产生相应的变化。因此,城市和人本尺度研究也应更多开展涉及时间变化的空间网络分析,从而将研究目的由现象解释拓展到趋势预测的层面。另外,越来越多的研究发现不同时段中城市空间的使用方式也有所区别,因此基于高频数据的多尺度城市空间网络动态分析也具有较大的研究前景^[2]。

流类型方面,目前城市和人本尺度研究由于受限于数据获得难度以及对数据空间精度的要求,不如区域尺度研究针对的流类型丰富,如区域尺度研究中的人流、物流、信息流相关的研究都层出不穷^[90-91]。但未来城市和人本尺度均有对更多流类型进行研究的机遇,例如可以研究以外卖或快递为代表的物流,以城市内部各子区域间的信息交互为代表的信息流等。

此外,目前各尺度上均有很多城市网络现象尚未得到系统研究,既有的关于时间状态、流类型等方面的研究也远不够完善,因此多尺度城市空间网络分析在研究内容上有更大拓展空间。

5 结语

尺度对城市空间网络研究具有极大影响,其原因是多方

面的:从复杂系统的角度看,城市空间的分形属性使其在不同尺度下观察会呈现类似但不完全相同的模式,使不同尺度的城市研究既可以相互借鉴又有所区别;从现实需求的角度看,不同尺度空间的研究目的有一定差异,因此人们会采用与研究目的和内容匹配的最适合的研究方法,使得区域、城市和人本尺度研究中倾向使用的研究方法产生一定区别;从数据获取的角度看,不同尺度研究中对数据的空间、时间精度以及其他属性的要求并不一致,因而相同的研究内容在不同尺度研究中开展的难度也不尽相同,这也进一步促进了不同尺度城市空间网络研究的差异化。

尺度对城市空间网络分析的影响主要体现在研究方法和研究内容上。研究方法方面,空间尺度越大,空间网络化过程中对现实空间的抽象程度越高,且更倾向于使用较为概括而非更精细的空间模型。测度内容上,尺度较大的城市网络研究侧重于对节点之间的关系、网络整体特征和节点聚类等方面进行测度,而针对较小尺度空间的研究则更多聚焦于对单个节点在整个网络中地位的测度。在与城市空间网络研究有一定交集的城市模型研究领域,已有相关学者认识到目前研究中存在着空间尺度越大,所分析的空间单元的空间颗粒度越低的问题,并号召在大尺度研究中采用小尺度研究的精细化空间单元^[92]。与之相似,在未来较大尺度的城市研究中若能结合较小尺度的精细化、网络化的方法和空间模型,将加深对网络现象的认识。而较小尺度的研究也可以引入整体网络评估和子区域识别等较大尺度研究所采用的方法,从而提升研究的准确性以及不同研究之间的可比性。同时,未来的研究也可不拘泥于现有的三个研究尺度。此外,目前的网络分析方法已可应用于大到全球级、小到大分子级的研究中,因此城市空间网络分析也存在与其他更大或更小尺度研究贯通的可能性。

研究内容与流类型方面,不同尺度研究均针对流网络结构、空间网络结构以及二者间的相互作用方式展开。但较大尺度研究中更倾向对网络现象进行刻画,涉及更多的流类型;而较小尺度则较多对作用方式开展更进一步的研究。在未来的研究中,较大尺度研究可参照较小尺度研究,进一步分析空间网络结构对流网络结构的作用方式,而较小尺度研究则可借鉴较大尺度研究中对作用方式中非空间影响因素的分析,也应针对更多流类型进行分析。网络状态上,较小尺度研究主要关注静态的网络现象,而较大尺度研究已开始涉及网络的演化研究。展望未来,研究可以将网络的演化研究拓展至较小尺度研究中,而不同尺度研究均可将城市网络现象随时间周期的变化纳入考量。此外,目前各尺度研究中均缺乏长时间、高频率的空间网络分析,这可作为未来一个可行的研究方向。**UPL**

注：文中图表均为作者绘制。

参考文献

- [1] CASTELLS M. The rise of the network society (the information age): economy, society and culture[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 1996.
- [2] BATTY M. The new science of cities[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2013.
- [3] 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 of the United States of America, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [4] DERUDDER B, WITLOX F. An appraisal of the use of airline data in assessing the world city network: a research note on data[J]. Urban studies, 2005, 42(13): 2371-2388.
- [5] SCHLAEPFER M, BETTENCOURT L M A, GRAUWIN S, et al. The scaling of human interactions with city size[J]. Journal of the Royal Society interface, 2014, 11(98): 20130789.
- [6] LOBO J, ALBERTI M, ALLEN-DUMASA M, et al. Urban science: integrated theory from the first cities to sustainable metropolises[R/OL]. (2020-01-28)[2021-05-01]. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3526940>.
- [7] RYBSKI D, ARCAUTE E, BATTY M. Urban scaling laws[J]. Environment and planning b: urban analytics and city science, 2019, 46(9): 1605-1610.
- [8] BATTY M. The size, scale, and shape of cities[J]. Science, 2008, 319(5864): 769-771.
- [9] 魏冶, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析[J]. 地理科学进展, 2020, 39(3): 488-502.
- [10] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207.
- [11] WEST G. Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies[M]. New York: Penguin Press, 2017.
- [12] MANDELBROT B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco, CA: W. H. Freeman, 1982.
- [13] BATTY M. Inventing future cities[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 2018.
- [14] BATTY M. On scale and size[J]. Environment and planning b: urban analytics and city science, 2020, 47(3): 359-362.
- [15] 杨滔. 空间句法：基于空间形态的城市规划管理[J]. 城市规划, 2017, 41(2): 27-32.
- [16] BATTY M, LONGLEY P A. Fractal cities: a geometry of form and function[M]. San Diego, CA: Academic Press, 1994.
- [17] 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.
- [18] 潘峰华, 方成, 李仙德. 中国城市网络研究评述与展望[J]. 地理科学, 2019, 39(7): 1093-1101.
- [19] 杨廷杰, 尹丹, 刘紫玟, 等. 基于大数据的流空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2020, 39(8): 1397-1411.
- [20] BARABASI A L. Network science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.
- [21] MAHUTAGA M C, MA X, SMITH D A, et al. Economic globalisation and the structure of the world city system: the case of airline passenger data[J]. Urban studies, 2010, 47(9): 1925-1947.
- [22] SALAT S. Cities and forms[M]. Paris, France: Editions Hermann, 2011.
- [23] 黄蔚欣, 张宇, 吴明柏, 等. 基于WiFi定位的智慧景区游客行为研究——以黄山风景名胜区为例[J]. 中国园林, 2018, 34(3): 25-31.
- [24] BIANCONI G. Multilayer networks: structure and function[M]. Oxford: Oxford University Press, 2018.
- [25] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. Physics reports, 2014, 544(1): 1-122.
- [26] KIVELÄ M, ARENAS A, BARTHELEMY M, et al. Multilayer networks[J]. Journal of complex networks, 2014, 2(3): 203-271.
- [27] 盛强, 杨滔, 侯静轩. 连续运动与超链接机制——基于重庆地面及地铁交通流量数据的大尺度范围空间句法实证分析[J]. 西部人居环境学刊, 2015, 30(5): 16-21.
- [28] HAGGETT P, CLIFF A D, FREY A. Locational analysis in human geography[M]. New York: Wiley, 1977.
- [29] NEAL Z. The connected city: how networks are shaping the modern metropolis[M]. New York: Routledge, 2013.
- [30] BARTHELEMY M. The structure and dynamics of cities: urban data analysis and theoretical modeling[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- [31] 马学广, 赵彩霞. 中国城市网络格局阶层与布局：航空客运流的实证[J]. 城市发展研究, 2020, 27(9): 66-71, 81.
- [32] 王启轩, 张艺帅. 广东省域城市网络的“核心—边缘”结构再解读——基于“流动空间”视角的实证研究[J]. 上海城市规划, 2020(4): 84-90.
- [33] 王均瑶, 宋崴, 刘彤起. 基于多元“流”数据的吉林省城市研究[J]. 规划师, 2020, 36(增刊2): 64-68.
- [34] 闫闪闪, 靳诚. 洛阳城区旅游流空间网络结构特征[J]. 地理科学, 2019, 39(10): 1602-1611.
- [35] 田深圳, 李守伟, 李雪铭. 我国滨海城市网络时空格局研究——基于2012—2019年百度指数数据[J]. 城市问题, 2020(8): 14-21.
- [36] 李帅, 彭震伟. 信息流视角下的成渝城市群空间组织特征及其规划探讨——基于百度指数的城市网络研究[J]. 西部人居环境学刊, 2020, 35(6): 49-57.
- [37] 周慧玲, 许春晓. 中国城市旅游信息流空间网络结构特征分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(20): 91-94.
- [38] HU X, SHEN P, SHI Y, et al. Using Wi-Fi probe and location data to analyze the human distribution characteristics of green spaces: a case study of the Yanfu Greenland Park, China[J]. Urban forestry & urban greening, 2020, 54: 126733.
- [39] 黄洁, 杜德林, 王姣娥, 等. 基于城市群尺度的高铁列车与长途汽车网络结构比较[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 1958-1966.
- [40] 孙继平, 侯兰功. 基于腾讯人口迁徙数据的成渝城市群网络结构特征研究[J]. 现代城市研究, 2020(9): 78-85.
- [41] 钱肖颖, 孙斌栋. 基于城际创业投资联系的中国城市和组织模式[J]. 地理研究, 2021, 40(2): 419-430.
- [42] HILLIER B, LEAMAN P, STANSALL P, et al. Space syntax[J]. Environment and planning b: urban analytics and city science, 1976, 3(2): 147-185.
- [43] BAFNA S. Space syntax: a brief introduction to its logic and analytical techniques[J]. Environment and behavior, 2003, 35(1): 17-29.
- [44] HILLIER B, MAJOR M, DESYLLAS J, et al. A study of the existing layout and new masterplan proposal[M]. London: Tate Gallery, Millbank, 1996.
- [45] 杨滔. 城市几何设计：空间句法的阐释[J]. 城市设计, 2019(4): 42-51.
- [46] DESYLLAS J, DUXBURY E. Axial maps and visibility analysis: a comparison of their methodology and use in models of urban pedestrian movement[C]// Proceedings, Third International Symposium on Space Syntax. Atlanta, 2001, 27: 1-13.
- [47] ERICSON J, CHRASTIL E, WARREN W. Space syntax visibility graph analysis is not robust to changes in spatial and temporal resolution[J/OL]. Environment & planning b. (2020-01-20)[2021-05-01]. DOI: 10.1177/2399808319897624.
- [48] ZHEN F, CAO Y, QIN X, et al. Delineation of an urban agglomeration boundary based on Sina Weibo microblog ‘check-in’ data: a case study of the Yangtze River Delta[J]. Cities, 2017, 60: 180-191.
- [49] PAN J, LAI J. Spatial pattern of population mobility among cities in China: case study of the National Day plus Mid-Autumn Festival based on Tencent migration data[J]. Cities, 2019, 94: 55-69.
- [50] ROTH C, KANG S M, BATTY M, et al. Structure of urban movements: polycentric activity and entangled hierarchical flows[J]. PLoS one, 2011, 6(1): e15923.
- [51] SHEN Y, BATTY M. Delineating the perceived functional regions of London from commuting flows[J]. Environment and planning a: economy and space, 2019, 51(3): 547-550.

- [52] LIN Y. E-urbanism: e-commerce, migration, and the transformation of Taobao villages in urban China[J]. *Cities*, 2019, 91: 202-212.
- [53] 武善梅, 王艳东, 乔梦玲, 等. 利用社交媒体数据探测细粒度城市子区域[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(9): 122-125.
- [54] 甘田, 刘鼎. 基于手机数据的职住空间关系研究——以重庆市主城区为例[J]. *城市交通*, 2020, 18(5): 36-44, 119.
- [55] SHEN Y, KARIMI K, LAW S, et al. Physical co-presence intensity: measuring dynamic face-to-face interaction potential in public space using social media check-in records[J]. *PLoS one*, 2019, 14(2): e0212004.
- [56] 龙瀛, 叶宇. 人本尺度城市形态: 测度、效应评估及规划设计响应[J]. *南方建筑*, 2016(5): 41-47.
- [57] LONG Y, YE Y. Measuring human-scale urban form and its performance[J]. *Landscape and urban planning*, 2019, 191: 103612.
- [58] LAMBIOTTE R, SINATRA R, DELVENNE J C, et al. Flow graphs: interweaving dynamic and structure[J]. *Physical review e: statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 2011, 84: 017102.
- [59] OMER I, KAPLAN N. Structural properties of the angular and metric street network's centralities and their implications for movement flows[J]. *Environment and planning b: urban analytics and city science*, 2019, 46(6): 1182-1200.
- [60] XU J, ZHANG M, ZHANG X, et al. How does city-cluster high-speed rail facilitate regional integration? evidence from the Shanghai-Nanjing corridor[J]. *Cities*, 2019, 85: 83-97.
- [61] KHALI-MIAB A, VAN STRIEN M J, AXHAUSEN K W, et al. Combining urban scaling and polycentricity to explain socio-economic status of urban regions[J]. *PLoS one*, 2019, 14(6): e0218022.
- [62] ZHEN F, QIN X, YE X, et al. Analyzing urban development patterns based on the flow analysis method[J]. *Cities*, 2019, 86(1): 78-97.
- [63] GEHL J, GEMZØE L. *Public spaces-public life*[M]. Copenhagen: Danish Architectural Press, 1996.
- [64] 王珏, 钮心毅. 长江三角洲城市群核心区的功能多中心特征和规划响应——基于城际出行联系的研究[J/OL]. *国际城市规划*. (2020-05-11)[2021-02-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5583.TU.20200722.1127.003.html>.
- [65] SEROK N, LEVY O, HAVLIN S, et al. Unveiling the inter-relationships between the urban streets network and its dynamic traffic flows: planning implication[J]. *Environment and planning b: urban analytics and city science*, 2019, 46(7): 1362-1376.
- [66] MATYUS T, SEER S, SCHROM-FEIERTAG H. Simulation-based forecasts of crowd flows at major events using real-time measurements[C] // *Traffic and Granular Flow '15*. Cham: Springer, 2016: 329-336.
- [67] SHI S, PAIN K. Investigating china's Mid-Yangtze River economic growth region using a spatial network growth model[J]. *Urban studies*, 2020, 57(14): 2973-2993.
- [68] LAROTTA S, SILVA P. A gravity model analysis of determinants of international migration from Colombia 1990-2015[J]. *Territorios*, 2019, 41: 69-100.
- [69] SIERRA-PAYCHA C. The remigration of immigrants in Spain. beyond distance and pull factors: the migratory network effect (2007-2014)[J]. *Territorios*, 2019, 41: 45-68.
- [70] SALDARRIAGA J F, HUA Y. A gravity model analysis of forced displacement in Colombia[J]. *Cities*, 2019, 95: 102407.
- [71] RAIMBAULT J. Indirect evidence of network effects in a system of cities[J]. *Environment and planning b: urban analytics and city science*, 2020, 47(1): 138-155.
- [72] YANG H, DIJST M, WITTE P, et al. Comparing passenger flow and time schedule data to analyse high-speed railways and urban networks in China[J]. *Urban studies*, 2019, 56(6): 1267-1287.
- [73] WANG S, WANG J, LIU X. How do urban spatial structures evolution in the high-speed rail era? case study of Yangtze River Delta, China[J]. *Habitat international*, 2019, 93: 102051.
- [74] 周慧玲, 王甫园. 基于修正引力模型的中国省际旅游者流空间网络结构特征[J]. *地理研究*, 2020, 39(3): 669-681.
- [75] GOREMYKO M V, MAKAROV V V, HRAMOV A E, et al. Betweenness centrality in urban networks: revealing the transportation backbone of the country from the demographic data[C] // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2018, 177: 012017.
- [76] ALKHEDER S, ABDULLAH W A A, AL-RUKAIBI F, et al. Mobility patterns for newly proposed metro system in Kuwait[J]. *Journal of urban planning and development*, 2020, 146(1): 04019020.
- [77] OSORIO-ARJONA J, GARCIA-PALOMARES J C. Social media and urban mobility: using Twitter to calculate home-work travel matrices[J]. *Cities*, 2019, 89: 268-280.
- [78] LIU Z, WANG S, WANG F. Isolated or integrated? planning and management of urban renewal for historic areas in old Beijing city, based on the association network system[J]. *Habitat international*, 2019, 93: 102049.
- [79] ZHANG P, ZHOU J, ZHANG T. Quantifying and visualizing jobs-housing balance with big data: a case study of Shanghai[J]. *Cities*, 2017, 66: 10-22.
- [80] KIELAR P, BIEDERMANN D, KNEIDL A, et al. A unified pedestrian routing model combining multiple graph-based navigation methods[C] // *Traffic and Granular Flow '15*. Cham: Springer, 2016: 241-248.
- [81] ABEDI N, BHASKAR A, CHUNG E, et al. Assessment of antenna characteristic effects on pedestrian and cyclists travel-time estimation based on Bluetooth and WiFi MAC addresses[J]. *Transportation research part c: emerging technologies*, 2015, 60: 124-141.
- [82] ALOY J M, MAGRINYA F, DE MEDINA M C A. Centrality measures and intermediate scale: the potential structuring role of the road network in Valles Oriental[J]. *Ace-architecture city and environment*, 2019, 14(39): 11-36.
- [83] 闫闪闪, 靳诚. 基于多源数据的市域旅游流空间网络结构特征——以洛阳市为例[J]. *经济地理*, 2019, 39(8): 231-240.
- [84] FENG X, LI K, DING C, et al. Bayesian network modeling explorations of strategies on reducing perceived transfer time for urban rail transit service improvement in different seasons[J]. *Cities*, 2019, 95: 102474.
- [85] QIN X, ZHEN F, GONG Y. Combination of big and small data: empirical study on the distribution and factors of catering space popularity in Nanjing, China[J]. *Journal of urban planning and development*, 2019, 145(1): 05018022.
- [86] 邱坚坚, 刘毅华, 陈浩然, 等. 流空间视角下的粤港澳大湾区空间网络格局——基于信息流与交通流的对比分析[J]. *经济地理*, 2019, 39(6): 7-15.
- [87] SHI S, WALL R, PAIN K. Exploring the significance of domestic investment for foreign direct investment in china: a city-network approach[J]. *Urban studies*, 2019, 56(12): 2447-2464.
- [88] DANYLUK M. Fungible space: competition and volatility in the global logistics network[J]. *International journal of urban and regional research*, 2019, 43(1): 94-111.
- [89] TAYLOR P J. City generics: external urban relations in ancient-Mesopotamian and modern-global city networks[J]. *Urban geography*, 2019, 40(8): 1210-1230.
- [90] 龙瀛, 刘曦, 王晟. 中国电子商务空间格局研究——以某大型电商为例[J]. *上海城市规划*, 2016(5): 86-93.
- [91] 席广亮, 甄峰, 张敬, 等. 网络消费时空演变及区域联系特征研究——以京东商城为例[J]. *地理科学*, 2015, 35(11): 1372-1380.
- [92] 龙瀛, 吴康, 王江浩, 等. 大模型: 城市和区域研究的新范式[J]. *城市规划学刊*, 2014(6): 52-60.

(本文编辑: 高淑敏)