

上海市中心区居住空间组织网络模式及测度* ——整合物质和社会空间的复杂网络分析

Research on the Structural Network Pattern and Measurement of Urban Residential Space in Central Urban Area of Shanghai: Complexity Network Analysis Integrating Physical and Social Space

杨帆 王佳音 YANG Fan, WANG Jiayin

摘要 住宅区是城市建成地区的主要功能空间。选择上海市中心城为研究范围,采用复杂网络理论和分析方法,以住宅区为网络“节点”,以空间邻近性和社会互动为网络“连边”,建构居住空间网络,分析测度居住区“度”分布,检验居住空间网络的鲁棒性,并识别网络“社团”。发现城市居住空间网络稳定性意味着和谐、顺畅的社会交往和信息传递,其中大“度”节点住宅区发挥着重要作用,应予以重点关注。居住空间网络“社团”识别的结果对解读城市地域认同有借鉴意义。结论为建立“物质空间”和“社会空间”相融合的城市住宅区空间结构研究提供了新的思路和方法,同时对大都市建成区单元规划和空间更新有借鉴意义。

Abstract Residential areas are the main functional space of urban built-up areas. Currently, the research approaches correlating social interactions with spatial representations to explain urban residential spatial structure are not mature. We select the central urban areas of Shanghai as the research scope. Based on the complex network theory and analysis methods, with the shape center of residential quarters as the network "node", and the spatial proximity and social connotation characteristics of residents' social interaction as the network "tie", the urban residential space network (URSN) in the central area of Shanghai is constructed. Furthermore, the "degree" distribution and network robustness of URSN are examined, and the network "communities" are identified. The research points out that, the stability of the URSN implies harmonious and smooth social interactions and information transfer, in which the large degree node residential quarters play an important role and should be given priority attention in urban renewal. Meanwhile, the "communities" identification results of URSN have implications for the understanding of the territory identity in urban areas. The conclusions of the research provide new concepts and methods for the study of the URSN that integrate "physical space" and "social space", and have reference significance for unit planning and spatial renewal in metropolitan areas.

关键词 居住空间网络;住宅区;空间肌理;复杂网络分析;中心城区;上海

Key words urban residential space network (URSN); residential areas; spatial fabric (SF); complex network analysis; central urban area; Shanghai

文章编号 1673-8985 (2024) 04-0085-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20240412

作者简介

杨帆

同济大学建筑与城市规划学院

副教授,博士生导师

fanyangsh@tongji.edu.cn

王佳音

同济大学建筑与城市规划学院

硕士研究生

中国城市经历了40多年快速发展,人口大量集聚、空间规模不断扩大。在北京、上海等超大城市,人口和建设用地的增长尤为迅速^[1]。随着城市更新成为国家发展的重要政策,存量住宅和老旧小区的改造成为研究热点。国务院、住建部相继发布政策,将解决城市人口的居住问题放在更加重要的位置^[2]。居住空间是城市重要功能构成,不仅分布面广,而

且承载多元复杂的社会关系。从总结过往经验和推进建成环境优化两个方面考虑,相应实证和理论研究显得非常迫切。

1 相关研究

1.1 城市社会空间与物质空间

城市空间结构是经济社会活动的结果。它反映了人口择居、就业、交往、出行、交易等活

*基金项目:国家自然科学基金“城乡工业用地空间绩效评价及转型更新机理研究”(编号51778436)资助。

动的集聚和特征,表现为不同功能的空间分布^[3];其中,“居住性”是城市的最基本职能^[4]。因此,以个体和家庭居住行为为研究对象,逐渐形成两个研究领域:其一,侧重于社会空间的研究,包括个体、群体、社会组织的时空过程等方面;其二,侧重于物质空间的研究,包括住宅和住宅区空间结构^[5]等方面。

城市社会空间是社会关系的载体。与乡村社会由血缘和族群联系组织起来的机制不同,城市居民通过各类“生意”和“交换”相互结识,基于契约建立起陌生人之间的联系进而形成社会关系,其中包括组建家庭^{[6],[7]}^[25](见图1)。因此,城市中人与人的交往方式与社会关系存在多样性和异质性,社会空间具有复杂性和融合性^[8]。不同社会群体的居住分化、居住隔离^[9],社会关系的培育和维持^[10],社会关系和社会运行所具有的时空性^[11]等成为人们共同关注的问题。

城市居住空间体现了人居环境的物质性和社会性两方面内涵。通过日常行为和择居,居民产生了阶层认同^[12]和地域认同^[13],因此住宅的物质性差异反映了社会空间的异质性^[14]。住房市场化和更新再开发等过程往往引发既有社会关系重构^[15],导致居住物质空间和社会空间进一步复杂且多样化,甚至产生“住房不平等”现象^[16-17]。为此,城市规划理论和实践强调对社会关系的保护和修补^[18],促进丰富且持续的空间和地缘关系^[19],实现城市空间结构的优化^[20]。

1.2 城市空间网络研究

城市空间网络研究通常关注呈现网络形态的空间要素^[21]。如城市道路、地铁和市政设施管网等。有学者基于开放街道数据,测度城市街道网络“度”分布和网络效率^[22],计算街道熵(entropy of street)、街道段长度(street segment length)、平均回路指数(average circuitity)和平均节点度(average node degree)等指数,以揭示城市街道网络秩序^[23]。

城市空间网络研究也在逐步关注一些本身不具有网络形态的空间要素。例如,将城市

建成区用格网划分,根据格网内主要功能将城市划分为就业、居住、景观和可达性4类吸引力地区,通过重力模型测度格网单元之间网络连接和便利设施的分布^[24]。也有将城市空间划分为城市肌理(urban fabric)单元,分析建筑相互联系以及形状和边界的分形特征^[25],为城市更新策略提供参考。

复杂网络理论和方法为理解城市社会空间提供了新视角。针对演员、科学家的研究揭示了合作关系的多重复合社区现象(multiplex communities),以及“小世界”^[26-27]和多层网络(多重属性的异构性)特征^[28]。基于社交媒体发文(帖)引证关系的研究,通过解析社交网络的社区结构、强弱关系和网络演变,以及价值传递和社会资本特征^[29],发现信息路径短的居民之间关系更加稳定^[30]。

将复杂网络理论(Complex Network Theory)应用于城市研究,逐步形成复杂城市系统(Complex Urban Systems, CUS)研究新领域。在小世界^[31]和无标度特征^[32]基础上,将复杂网络理论与城市韧性理论相结合,利用网络拓扑结构探讨网络节点失效的可能性及受损后的恢复能力,为定量描述城市韧性提供了有效的分析方法^[33-34]。例如对地铁网络关键站点的识别和电力网络韧性的测度^[35]等。

1.3 复杂网络分析与城市空间结构研究

许多城市现象本质上是网络现象,如等级规模、韧性、规模效益等^[36]。学者根据不同的研究问题,通过界定研究范围、网络“节点”(node)和“连边”(tie)从而构建出复杂网络,以便分析揭示城市空间结构生成和演化的内在机理。其中,“节点”被界定为“个人,组织,城市”等对象;“连边”被界定为“节点”之间的关联,既包括物理联系,也包括相互的影响、合作关系,甚至信息等的传播^[37]。因此,城市内部空间网络(urban intra-spatial network)研究有3个值得深入探究的方面:其一,空间网络的“节点”界定,应能反映研究问题所指向的城市空间类型。其二,空间网络的“连边”多为物质空间载体,还需反映城市社会与空间要素

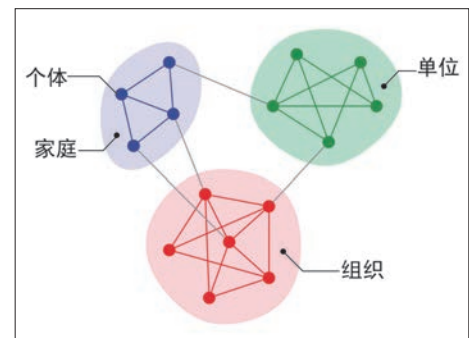
的互构。其三,网络结构分析多以压力、重力、引力或者“流”作为底层解释机制,通过信息、观点、关系等的“传播”将物质空间与社会空间结合起来的城市空间网络研究有待开展。

居住空间是城市空间结构的重要组成部分^[38]。运用复杂网络方法将物质空间和社会空间相结合以揭示居住空间结构特征,对城市空间规划具有理论和实践借鉴意义(见图2)。

2 研究数据和研究范围

2.1 研究范围

研究选择上海市中心城(城市外环线A20围合的范围),面积约660 km²。包括了中心城七区即黄浦区、徐汇区、长宁区、杨浦区、虹口区、普陀区、静安区外环线以内的部分,以及浦



注:个体形成组群,组群间联系通过关键节点完成。
图1 基于个体间关系的城市社会空间网络结构示意图
Fig.1 Structure diagram of urban social-space network based on individuals

资料来源:笔者根据文献[7]25绘制。

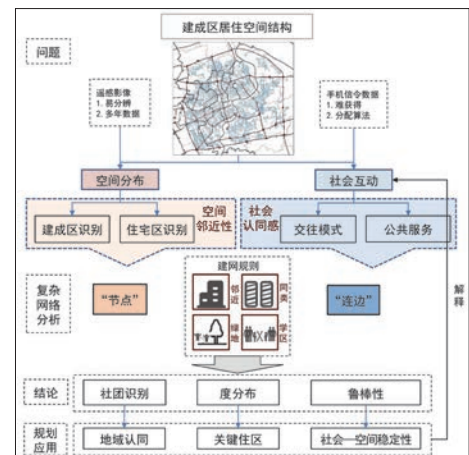


图2 研究设计及主要内容

Fig.2 The concepts and main contents of research

资料来源:笔者自绘。

东新区和其他毗邻行政区划中外环线以内的部分(见图3a)。该地区是上海市集中建成地区,人口分布密集;2021年常住人口约为1 200万人,占上海总人口的近50%。研究范围也是上海经济社会活动最活跃的地区,空间演进历久且复杂,功能结构不断变化,住宅区类型多样。

2.2 研究数据

通过网络开放数据平台获取上海市2000—2020年卫星影像地图^①,并通过查询各区政府及民政部门官方网站,获得2000—2020年详细至街道的行政区划边界。进而,完成相关基础数据的整理。

2.2.1 各种类型住宅区的范围识别

从高德地图获取住宅区AOI数据,包括经纬度、边界和名称等信息^②。将其与卫星影像地图整合,采用半监督分类和人工目译方法对AOI数据进行校对^[39-40]。根据住宅区建筑肌理和建成时间等特征将其分为“商品房、工人新村、花园里弄、里弄、独栋公寓、别墅”6种类型^[41-43](见图3b)。住宅区面积规模存在较大差异,一定程度上反映了聚居规模特点,但还不能形成居住空间结构判断(见图4)。

2.2.2 公园绿地及空间分布

从高德地图获取公园绿地AOI数据。同时,通过半监督分类法对卫星影像中的城市绿

地进行提取。修整边界并筛选可供人活动的开放绿地,得到研究范围内所有公园绿地的矢量数据(见图5a)。

2.2.3 学区范围

根据各区政府网站发布的2020年小学学区划分通知,结合网络公开发布的学区划分信息^③,录入高德地图,得到研究范围2020年所有学区的空间边界(见图5b)。

3 研究方法与研究设计

3.1 基于卫星影像的空间识别方法

采用ENVI软件对谷歌地球卫星图像进行半监督学习(SSL),利用少量的标记样本和大量的未标记样本,结合低通滤波和灰度共现矩阵的平均特征识别和划定住宅区空间边界,实现对住宅区的分类和提取。

3.2 复杂网络分析方法

3.2.1 网络构建

首先,界定“节点”“连边”的内涵。其一,以个体为研究对象而构建的网络,其“节点”为个体,目的为揭示人际关系和互动机理(个体网)。以群体为研究对象而构建的网络,其“节点”为一个“集群”或者“聚落”,目的为揭示整体性结构特征(整体网)^[44]。其二,“连边”反映了“节点”之间的关系或者联系,既

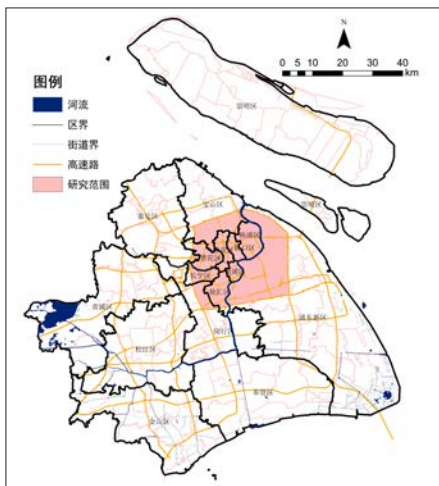
反映二者的从属性,也反映二者关系的强弱;既可以是无形的联系,也可以是有形的关系。因此,完成网络分析所基于的数据既包含“节点”的属性数据(attribute data),也包含“连边”的关系数据(relational data)。

其次,根据网络分析的基本规则,将识别出的每个住宅区空间范围形心作为“节点”。将居民日常交往活动而产生的住宅区之间的关联作为“连边”。由于居住“物质(地理)空间”是外在形式,“社会空间”是内在实质^[45],因此,兼顾空间邻近性和社交互动便利性,将住宅区之间“连边”的基本规则设定如下:

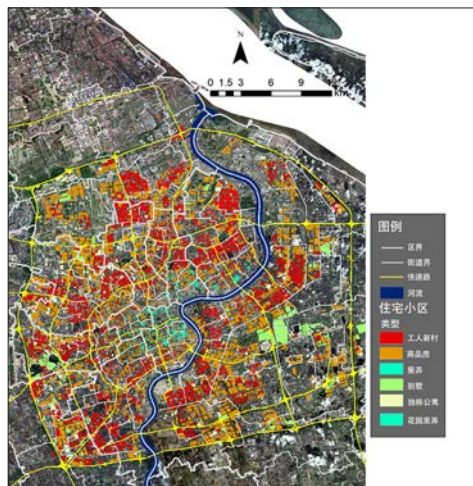
(1) 相距500 m内的住宅区。根据地理学第一定律^④,以及人类出行范围对标度法则的遵循^[46],空间邻近的住宅区关系更加紧密。既有研究指出,居住邻近性与居民社会交往之间存在非线性关系,随着距离的增加而迅速衰减^[47]。在街道、便利店、街角等公共区域,居民通过日常活动与交往互动相互认识或产生社会关系的概率较大,并且500 m是多年龄人群共同的适宜步行距离。

(2) 相距500 m内的同类型住宅区。受收入和职业等因素的影响,居民会选择不同的空间范围活动和交往^[48]。住宅区类型一定程度上反映了由房价导致的居住人群差异,以及居民生活方式、生活轨迹和居民活动空间重叠方式的差异^[49]。

(3) 同一小学学区内的住宅区。最近的研究发现,中国大都市的小学学区对居民互动有正向影响,同一学区内居民之间有更广泛的社会交往和更紧密的联系,跨住宅区的社会互动更为普遍^[50]。长期以来,住宅区规划中强调



a 研究范围
图3 研究范围和住宅区分布
Fig.3 The location of study area in Shanghai



b 住宅区类型及分布

资料来源:笔者自绘。

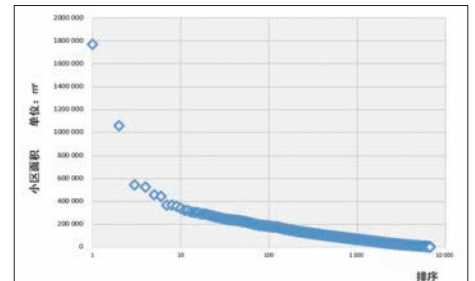


图4 研究范围内住宅区规模特征
Fig.4 The scale characteristics of residential areas in the study area

资料来源:笔者自绘。

注释: ① <https://earth.google.com/web/>, 2021-06-10。
② <https://www.amap.com/>。
③ https://www.sohu.com/a/386317057_120621829, 2022-12-19。
④ 地理事物或属性在空间分布上互为相关。

⑤ 任何地点的访客数量都会随着其访问频率与出行距离的乘积的反平方而减少。

按照人口规模配置小学,并结合到一定规模住宅区内建设^[51],客观上促成了这一社会现象。以家庭成员通学和接受基础教育为纽带,增加了同一小学学区内居民之间跨年龄、职业、收入和家庭的交往机会^[52]。

(4) 同一公园绿地500 m范围内的住宅区。公园和广场有利于陌生人之间的社交互动^[53],共同参与活动提高了相互认识的概率,成为产生居民跨住宅区关联的又一重要诱因^[54]。

根据上述4条规则,在研究范围构建出具有物质空间邻近和社会空间关联双重内涵的城市居住空间网络(URSN)(见表1)。此外,研究范围中一些空间要素对居民交往存在阻隔,如城市道路、高架桥等;由于穿越这些空间要素的路径已为规划建设所提供,研究充分考虑了这些因素,并对“连边”做优化处理。

3.2.2 网络分析

复杂网络分析有助于揭示在一定研究范围内被定义为“节点”的研究对象的趋同性和集聚特征,以解读社会和空间的同质性和异质性;同时,有助于分析信息在网络中的传播,以及个体偏好和选择产生的“节点”间联系,从而揭示城市空间背后的经济社会机制。

(1) 网络鲁棒性

网络鲁棒性(robust)亦指网络的稳定性。鲁棒性测度可用于衡量网络的韧性(resilience),揭示网络面对干扰的恢复能力,并找到关键节点^[55-56];反映网络受到破坏或者

结构变化时,保持网络原有整体功能的能力以及自我寻找替代性连道路径的能力。通常检验网络鲁棒性的方法有“攻击”检测、“渗流”检测和黏菌实验^{[57]339-354}(见图6)。其中,网络“攻击”方式又可分为随机攻击和蓄意攻击2种。随机攻击是随机地移除“节点”或“连边”,而蓄意攻击则是按照“度”的大小依次删除网络中的“节点”,以此来测度网络的连通性和稳定性,获得网络“崩溃”的阈值;阈值越高则说明网络越具有鲁棒性。

将针对“节点”的“攻击”对应于现实中某些住宅区的拆迁改造、实施封控以及入住率过低等情况;将对“连边”的“攻击”对应于现实中绿化、活动空间、基础教育等设施配置过少的情况。居住空间网络(URSN)的鲁棒性反映了物质空间和社会空间网络自我修复、形成连通回路的能力^[56]。同时,基于社会关系建立的网络与基于物质载体建立的网络具有不同的网络传播机制,鲁棒性因此具有不同的经济社会解释。通过最大连通子图的相对大小和网络效率进行网络鲁棒性测度^[59]。

① 最大连通子图。是指以最少的“连边”把网络中的所有“节点”连接起来的子图,其相对值等于最大连通子图中“节点”的数目与网络中“节点”数目之比,即:

$$S = \frac{|V'_d|}{|V_d|} \quad (1)$$

式中:|V'_d|为最大连通子图中“节点”的

数目。

② 网络效率。是指所有“节点对”之间效率的平均值,是衡量网络通行能力的重要指标。计算式为:

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

式中:N为网络中“节点”的总数;d_{ij}为节点i到节点j的最短距离。

(2) 网络“社团”识别

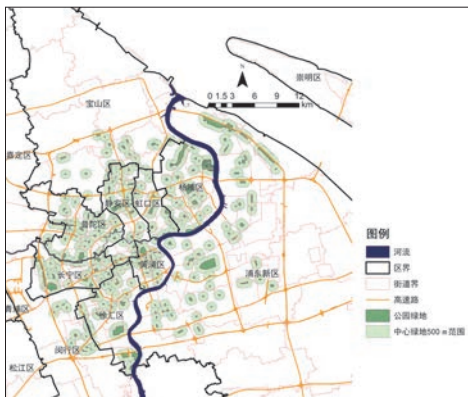
复杂网络中的“社团”(community)指内部连接密集、外部连接稀疏的节点集合^{[57]399-407}。“社团”算法将节点划分为组团,组内节点关系密切,组间节点关系稀疏^[60],用于探索节点的聚类关系,

表1 住宅区间建立“连边”的规则

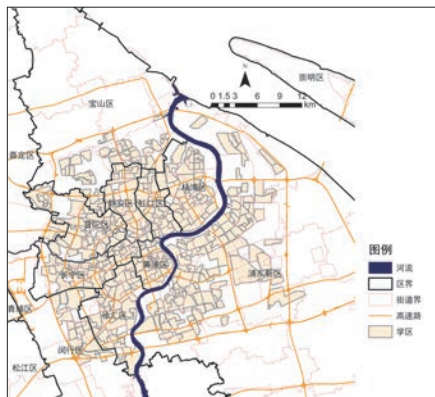
Tab.1 The rule of "tie" establishment connecting the residential quarters

规则	图示
规则(1)	
规则(2)	
规则(3)	
规则(4)	

资料来源:笔者自制。



a 绿地分布及步行可达范围



b 小学学区划分

图5 研究范围内绿地和小学学区分布

Fig.5 Distribution map of green facilities and primary school districts

资料来源:笔者根据官方公开数据绘制。

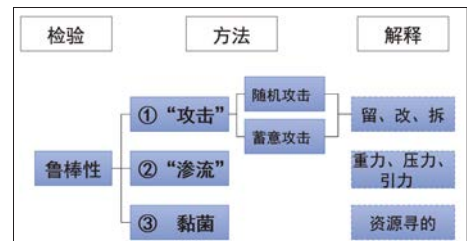


图6 检验网络鲁棒性的常用方法

Fig.6 Test methods for the network robustness

资料来源:笔者自绘。

比如,引文网络中不同研究领域的区分^[61]。

对住宅区进行“社团识别”,既反映了空间组织层面对相邻性、设施共享和学区划分的考虑,又反映了相近社会背景、生活方式、生活特征和社会信任居民的选择结果。计算式为:

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{i,j} \left[A_{ij} - \frac{K_i K_j}{2m} \right] \delta(c_i, c_j) \quad (3)$$

式中:Q为模块度, A_{ij} 表示节点i和节点j之间的边的权重值(本文中边的权重都是1); K_i 表示节点i的度; c_i 表示i所属的“社团”;如果节点i和节点j属于同一个“社团”, $\delta(c_i, c_j)$ 为1,否则为0; m 表示网络中边权重的总和。在运算时,每个节点被分配到一个不同的“社团”。每次计算都会从它所属的“社团”中取出一个节点,加入邻近的“社团”,并计算这个“社团”模块度的变化。如果收益小于0,那么它就被放回原来的“社团”;否则就将其加入具有较大收益的“社团”。反复执行直到所有节点所在的“社团”不再改变。

4 研究结果

4.1 研究范围住宅区“度”差异明显

本文中的“度”代表某住宅区居民与其他住宅区居民的日常交往互动,即他们因使用相同公共设施和公共空间而产生社会经济关联的可能性。“度”越大则表示该住宅区居民更有可能与城市中其他居民的生活轨迹发生重叠,也更有可能发生跨住宅区社会交往。相反,则表明住宅区可能相对独立和封闭,与其他住宅区联系较少^[62-63]。

2020年的居住空间网络(URSN)中“节点”之间的“度”差异明显。“度”分布整体呈泊松分布,而非幂律分布^{[57]81-86, [64]}。其中,住宅区最大的“度”为126.0,最小的为0;大部分住宅区的度在10.0至50.0之间,平均为33.2,极少数超过100.0。这意味着大部分住宅区的居民会与附近30个左右住宅区的居民有生活轨迹重叠和交往;极少数住宅区的居民能够与周边100个以上住宅区存在联系。

“度”较高的住宅区在促进社会融合、提高城市活力方面有更关键的作用。除了住宅区

内户数多、人口多可能增加对外交往之外,较高的经济社会地位、较广泛的人际交往能力都造成了住宅区“度”分布有明显的市中心大、边缘地区小的特征;浦西居住区的“度”普遍高于浦东,中心区住宅区的“度”普遍高于外围。“度”最高的住宅区集中在黄浦区西北部、黄浦区与静安区交界部,以及虹口区的北外滩地区;“度”较高的住宅区分布于长宁区南部和西部、徐汇区北部和杨浦区西南部(见图7)。

4.2 居住空间网络的大“度”节点和鲁棒性测度

城市居住空间网络(URSN)产生网络“崩溃”意味着不同住宅区居民之间日常交往受阻、共同活动消失,住宅区成为空间“孤岛”。例如,一些住宅区的拆迁对居民交往活动产生不利影响。由于黄浦江的空间阻隔,本文选取最大连通子图作为初始网络。测度结果发现:

其一,居住空间网络在随机攻击下呈现较强的鲁棒性,在蓄意攻击下则较为脆弱。当移除节点达30%时,蓄意攻击模式最大连通子图规模下降更快。而且,蓄意攻击模式下,网络效率迅速减小,当移除“节点”达到60%时,网络几乎完全瘫痪不再连通;随机攻击模式下,当移除60%“节点”时,网络效率才开始明显减小(见图8a)。

其二,居住空间网络鲁棒性与住宅区类型存在关系。具有大“度”节点特征的住宅区大多为里弄式住宅区(见图7a)。进一步采用

规则(2)建立里弄、工人新村两种类型住宅区的居住空间网络,分别测度其鲁棒性。结果显示,里弄住宅区的网络效率和面对攻击呈现出的鲁棒性远高于工人新村住宅区,是具有较高稳定性的居住空间模式(见图8b-图8c)。

其三,对“度”较大住宅区的拆除或人为封闭会导致整个城市居民交往、信息交换和传播概率降低,容易产生社会隔离、活力降低等负面效应(见图8c,图9)。

4.3 居住空间“社团”识别及分布特征

住宅区“社团”是相互联系紧密的若干住宅区的空间集合。复杂网络分析根据网络中住宅区“节点”的社会关联来确定住宅区集群以及住宅区的聚类和分化。

根据2020年数据,在研究范围共识别出73个住宅区“社团”。特征如下:其一,“社团”规模普遍较大。规模最大的“社团”位于黄浦区中部,拥有445个“节点”(即住宅区)。有14个社团的“节点”数量在200个以上,13个“社团”的“节点”数量在100—200个之间,其余“社团”规模相对较小。其二,“社团”边界与行政区划、重要交通线的边界明显吻合。这是建网规则中学区边界和地理邻近性共同作用的结果。其三,内环线内分布有15个规模较大的“社团”,而规模较小的“社团”则位于研究范围边缘。其四,“社团”识别结果与居民日常认知存在重合且有共同标识(见图10)。

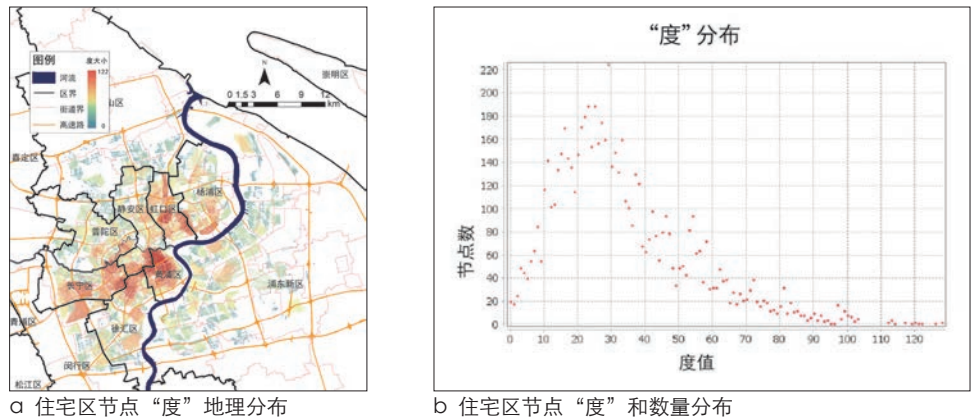


图7 研究范围内居住空间网络“度”分布情况(2020年)
Fig.7 Distribution of URSN “degree” in the study area of Shanghai (2020)

资料来源:笔者自绘。

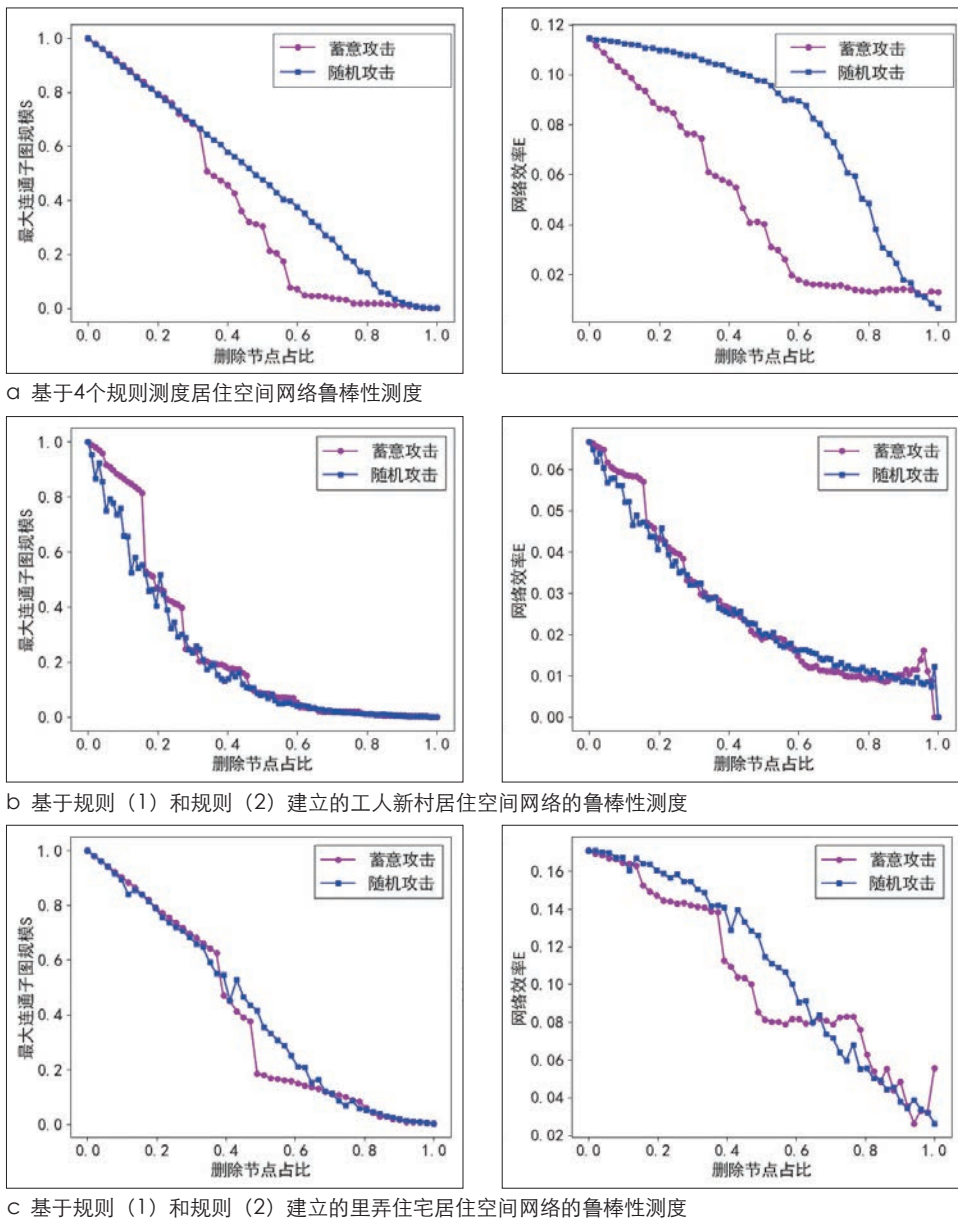


图8 研究范围内居住空间网络鲁棒性测度 (2020年)
Fig.8 Network robustness measure of URSN in the study area of Shanghai (2020)

资料来源:笔者自绘。

5 讨论

5.1 网络分析揭示了城市居住空间的物质、社会两面性

“物质空间”“社会空间”相结合的复杂网络建构规则,揭示了住宅区空间分布与社会关联共同作用下的城市居住空间网络(URSN)特征。反映了围绕家庭成员展开的城市社会组织模式,以及经典规划理论和方法干预城市社会空间组织的有效性。测度结果反映了住宅区

之间社会关联的程度,以及由共享设施建立起的邻里关系的稳定性。

其一,有较高服务设施配置水平的地区,为居民建立社会关系创造了条件,住宅区的“度”和中心性普遍较高;其中,基础教育设施和绿地活动空间的作用尤为突出。

其二,住宅区类型是影响城市居住空间网络稳定性的另一重要因素。里弄住宅区为邻里交往提供了丰富的适宜空间,促进了社会关系

的多元化。它在网络中的“度”最大、中心性最高,对网络完整性和稳定性的影响最为关键。公寓型住宅区由于数量较大、分布分散,也有利于网络的稳定性^[65]。新建商品房住宅区往往面积规模较大,空间相对封闭,与周边居住区联系较少,易导致网络松散、脆弱,影响网络的稳定性。

5.2 网络“社团”识别反映了地域认同

“社团”识别出的范围是住宅区之间居民互动较为紧密的地区。反映了居民的地域认同,即居住地相互邻近、日常活动范围相互重叠,且有相同的地标认知,更可能通过共用公共空间和公共设施建立起关系。其中,传统住宅区、工人新村片区都形成了明确的住宅区“社团”并与居民认知和地域归属感相一致。

基于“社团”识别进一步整合住宅区,发现在空间上有较强集聚态势的多个“社团”共同形成了具有地域认同(place identity)的城市空间“细胞”(cells)^[66]。将其与行政区划和控规单元边界相叠合,发现一个“细胞”往往会覆盖4—5个控规单元,边界重合度较高。空间“细胞”对划分规划管理和社会治理单元,合理配置中小学校、幼儿园、社区公园、文化体育等共享服务设施,建立社区治理机制和平台提供了新思路,值得进一步研究验证(见图11)。

5.3 研究展望和局限性

将住宅区规划意图和居民行为特征引入建边规则,相较仅依靠空间邻近性和个体合作关系建立的“随机网络”^[67]更接近现实情况。城市复杂网络分析对群体决策博弈、社会意愿表达^[68]以及观点、信息等的传播路径预测^[69]等研究有借鉴意义。居住空间网络研究为开展城市社会关系、疾病传播机制研究提供了基础,为通过空间手段干预不可见的关系网络提供了新思路。

研究存在以下局限性:首先,本文对一定规模群体聚居地进行的“粗粒化”(coarse graining),仅适合于特定空间尺度、时间尺度下的特定研究。后续需进一步根据研究问题拟定合适的空间“粗粒化”方案,并关照个体行为



图9 典型大“度”节点住宅区的风貌特征

Fig.9 Features of typical large-degree-node residential areas



资料来源: <http://www.assc.org.cn/SocietyNews/322>, 2022-12-26.

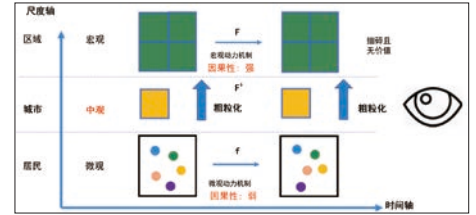
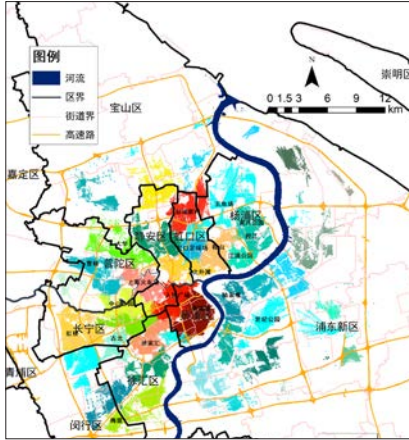


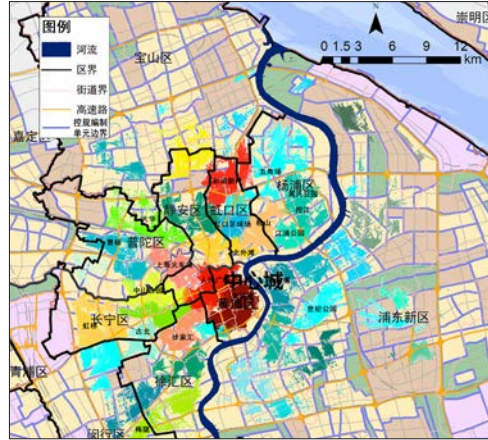
图12 城市研究中对数据和研究对象抽象化带来的问题示意

Fig.12 Problems caused by the graining of data and abstraction of research objects in urban research

资料来源: 笔者根据网络资料改绘, <https://swarma.org/?p=34352>.



a “社团”识别结果



b “社团”识别与单元规划的叠合

图10 研究范围内居住空间网络“社团”识别及分布 (2020年)

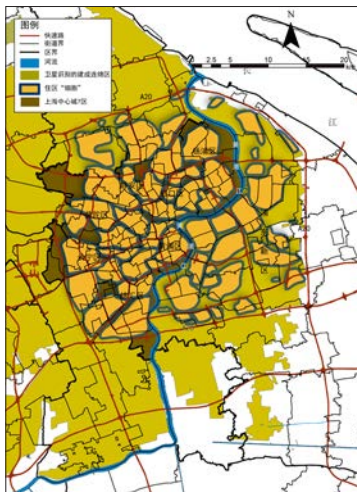
Fig.10 "Community" identification and distribution of URSN in the study area of Shanghai (2020)

资料来源: 笔者自绘。

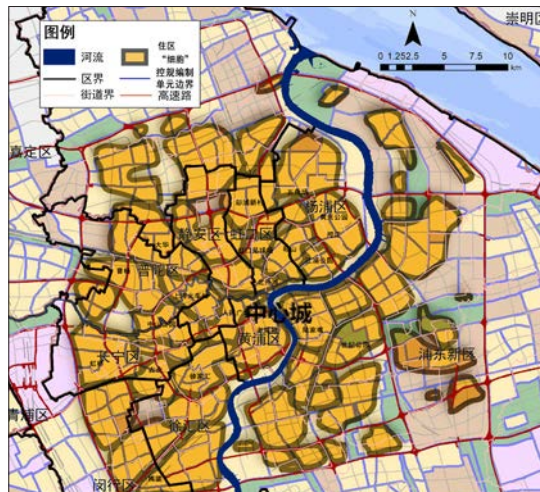
边规则对跨学区和行政区的社会关联和互动考虑不足;居民除日常活动之外还有其他类型社会互动,如工作、兴趣团体等;还需要探索使用更多数据源,如社交媒体数据和手机信令数据。

6 结语

本文将复杂网络分析应用于城市内部空间结构研究,通过对城市居住空间网络(URSN)的特征测度,揭示关键住宅区、居住空间结构稳定性和地域认同等空间组织模式。基于此,未来有望采用多源、多频大数据更细致地揭示城市空间网络的多重网络特征和演化、博弈与传播机制,为城市建成地区开展单元规划和详细规划创新提供新的思路 and 实现路径。



a 空间“细胞”分布图



b 空间“细胞”与单元规划的叠合

图11 研究范围内居住空间“细胞”示意图 (2020年)

Fig.11 Diagram of the residential spatial "cells" in the study area of Shanghai (2020)

资料来源: 笔者自绘。

与宏观现象之间的关联性和一致性(见图12)。其次,住宅区识别和居住空间网络构建规则需进一步优化。一方面,基于高清卫星影像采用机

器学习识别出的住宅区可能存在误差,忽视了住宅使用功能的变化。另一方面,数据准备和深化分析滞后于现实变化。最后,目前所采用的建

参考文献 References

[1] 国家统计局. 经济社会发展统计图表: 第七次全国人口普查超大、特大城市人口基本情况[EB/OL]. (2021-09-16) [2023-12-04]. http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-09/16/c_1127863567.htm. State Statistical Bureau. Economic and social development statistics chart: the seventh national census, the basic situation of the population of megacities[EB/OL]. (2021-09-16) [2023-12-04]. http://www.qstheory.cn/dukan/qs/2021-09/16/c_1127863567.htm.

[2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 完整居住社区建设指南(建办科(2021)55号)[S]. 2021. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Guide to building complete residential communities[S]. 2021.

[3] 周彬学,戴特奇,梁进社,等. 基于Lowry模型的北京市城市空间结构模拟[J]. 地理学报, 2013, 68(4): 491-505. ZHOU Binxue, DAI Teqi, LIANG Jinshe, et al. Simulation of urban spatial structure in Beijing

- based on Lowry model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(4): 491-505.
- [4] 黄志宏. 世界城市居住区空间结构模式的历史演变[J]. *经济地理*, 2007 (2) :245-249.
HUANG Zhihong. The evolution of urban residential space structure[J]. *Economic Geography*, 2007(2): 245-249.
- [5] 张文忠, 刘旺, 李业锦. 北京城市内部居住空间分布与居民居住区位偏好[J]. *地理研究*, 2003 (6) :751-759.
ZHANG Wenzhong, LIU Wang, LI Yejin. Housings' spatial distribution and residents' preference on housing location in Beijing[J]. *Geographical Research*, 2003(6): 751-759.
- [6] 李汉宗. 血缘、地缘、业缘: 新市民的社会关系转型[J]. *深圳大学学报 (人文社会科学版)*, 2013, 30 (4) :113-119.
LI Hanzong. Blood, geopolitical and professional ties: transformation of new urbanites' social relations[J]. *Journal of Shenzhen University (Humanities & Social Sciences)*, 2013, 30(4): 113-119.
- [7] NEWMAN M E J. Communities, modules and large-scale structure in networks[J]. *Nature Physics*, 2012, 8(1): 25-31.
- [8] 蔡禾, 贺霞旭. 城市社区异质性与社区凝聚力——以社区邻里关系为研究对象[J]. *中山大学学报 (社会科学版)*, 2014, 54 (2) :133-151.
CAI HE, HE Xiaxu. Heterogeneity and cohesion of urban communities: a study on neighborhood relations in communities[J]. *Journal of Sun Yat-sen University (Social Science Edition)*, 2014, 54(2): 133-151.
- [9] HE S J. Evolving enclave urbanism in China and its socio-spatial implications: the case of Guangzhou[J]. *Social & Cultural Geography*, 2013, 14(3): 243-275.
- [10] 黄勇, 石亚灵. 西南地区历史城镇社会网络保护评价探索研究[J]. *城市规划学刊*, 2018 (3) :40-49.
HUANG Yong, SHI Yaling. Evaluation and protection of social networks in historic towns in south-western China[J]. *Urban Planning Forum*, 2018(3): 40-49.
- [11] 易峥, 阎小培, 周春山. 中国城市社会空间结构研究的回顾与展望[J]. *城市规划汇刊*, 2003 (1) :21-24.
YI Zheng, YAN Xiaopei, ZHOU Chunshan. Urban social spatial structure research in China: review and prospect[J]. *Urban Planning Forum*, 2003(1): 21-24.
- [12] 张海东, 杨城晨. 住房与城市居民的阶层认同——基于北京、上海、广州的研究[J]. *社会学研究*, 2017, 32 (5) :39-63.
ZHANG Haidong, YANG Chengchen. Housing and the class identity of urban residents: a study based on data from Beijing, Shanghai and Guangzhou[J]. *Sociological Studies*, 2017, 32(5): 39-63.
- [13] 黄荣贵, 孙小逸. 社会互动、地域认同与人际信任——以上海为例[J]. *社会科学*, 2013 (6) :86-94.
HUANG Ronggui, SUN Xiaoyi. Social interaction, place identity and interpersonal trust: a study in Shanghai[J]. *Journal of Social Sciences*, 2013(6): 86-94.
- [14] 宋伟轩, 黄琴诗, 谷跃, 等. 宁杭城市多时空尺度居住空间分异与比较[J]. *地理学报*, 2021, 76 (10) :2458-2476.
SONG Weixuan, HUANG Qinshi, GU Yue, et al. A comparison study on residential differentiation at multiple spatial and temporal scales in Nanjing and Hangzhou[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(10): 2458-2476.
- [15] 何深静, 于涛方, 方澜. 城市更新中社会网络的保存和发展[J]. *人文地理*, 2001 (6) :36-39.
HE Shenjing, YU Taofang, FANG Lan. Protection and development of social networks in urban renewal[J]. *Human Geography*, 2001(6): 36-39.
- [16] 方长春. 中国城市居住空间的变迁及其内在逻辑[J]. *学术月刊*, 2014, 46 (1) :100-109.
FANG Changchun. Residential space changing in urban China and its inner logics[J]. *Academic Monthly*, 2014, 46(1): 100-109.
- [17] LI Z G, WU F L. Tenure-based residential segregation in post-reform Chinese cities: a case study of Shanghai[J]. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 2008, 33(3): 404-419.
- [18] 常江, 谢涪湘, 陈宏胜, 等. 城市更新对居民社区依恋的影响: 基于广州新老社区的对比研究[J]. *现代城市研究*, 2019 (9) :67-74.
CHANG Jiang, XIE Dixiang, CHEN Hongsheng, et al. The impacts of urban regeneration on residents' community attachment: a comparison between new and traditional communities in Guangzhou[J]. *Modern Urban Research*, 2019(9): 67-74.
- [19] 王开泳, 肖玲, 王淑婧. 城市社会空间结构研究的回顾与展望[J]. *热带地理*, 2005 (1) :28-32.
WANG Kaiyong, XIAO Ling, WANG Shujing. A review and outlook on the studies of urban social spatial structure[J]. *Tropical Geography*, 2005(1): 28-32.
- [20] 宗会明, 季欣. 1999—2018年重庆市主城区住宅用地空间演变特征及驱动因素研究[J]. *地理科学*, 2021, 41 (7) :1256-1265.
ZONG Huiming, JI Xin. Spatial characteristics and driving factors of expansion of residential land use in Chongqing urban area from 1999 to 2018[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(7): 1256-1265.
- [21] DING R, UJANG N, BIN HAMID H, et al. Application of complex networks theory in urban traffic network researches[J]. *Networks & Spatial Economics*, 2019, 19(4): 1281-1317.
- [22] PORTA S P V. The network analysis of urban streets: a dual approach[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2006, 369(2): 853-866.
- [23] BOEING G. Urban spatial order: street network orientation, configuration, and entropy[J]. *Applied Network Science*, 2019, 4(1): 67.
- [24] PAN H, DEAL B, CHEN Y, et al. A reassessment of urban structure and land-use patterns: distance to CBD or network-based? Evidence from Chicago[J]. *Regional Science and Urban Economics*, 2018, 70: 215-228.
- [25] BATTY M, LONGLEY P A. Fractal-based description of urban form[J]. *Environment and Planning B-Planning & Design*, 1987, 14(2): 123-134.
- [26] ROBINS G, ALEXANDER M. Small worlds among interlocking directors: network structure and distance in bipartite graphs[J]. *Computational & Mathematical Organization Theory*, 2004, 10(1): 69-94.
- [27] BATTISTON F, IACOVACCI J, NICOSIA V, et al. Emergence of multiplex communities in collaboration networks[J]. *PLoS One*, 2016, 11(1): e0147451.
- [28] BOCCALETTI S, BIANCONI G, CRIADO R, et al. The structure and dynamics of multilayer networks[J]. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 2014, 544(1): 1-122.
- [29] SHIAU W L, DWIVEDI Y K, YANG H S. Co-citation and cluster analyses of extant literature on social networks[J]. *International Journal of Information Management*, 2017, 37(5): 390-399.
- [30] GUO B, LIU L, LI Y. Simulation research on management modes of urban old residence community based on complex network[J]. *Complex Systems and Complexity Science*, 2019, 16(2): 41-51.
- [31] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [32] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. *Science*, 1999, 286(5439): 509-512.
- [33] ASPRONE D, CAVALLARO M, LATORA V, et al. Assessment of urban ecosystem resilience using the efficiency of hybrid social-physical complex networks[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2014, 29(8): 608-625.
- [34] VESPIGNANI A. Complex networks: the fragility of interdependency[J]. *Nature*, 2010, 464(7291): 984-985.
- [35] DERRIBLE S. Network centrality of metro systems[J]. *PLoS One*, 2012, 7(7): e40575.
- [36] 侯静轩, 张恩嘉, 龙瀛. 多尺度城市空间网络研究进展与展望[J]. *国际城市规划*, 2021, 36 (4) :17-24.
HOU Jingxuan, ZHANG Enjia, LONG Ying. The progress and prospects of the multi-scale urban space network research[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(4): 17-24.
- [37] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 网络科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020: 37-69.
WANG Xiaofan, LI Xiang, CHEN Guanrong. *Network science an introduction*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2020: 37-69.
- [38] 李仙德, 白光润. 转型期上海城市空间重构的动

- 力机制探讨[J]. 现代城市研究, 2008 (9): 11-18.
- LI Xiande, BAI Guangrun. On the dynamic mechanism of urban space reconstruction in Shanghai during the transitional period[J]. *Modern Urban Research*, 2008(9): 11-18.
- [39] HAN W, FENG R Y, WANG L Z, et al. A semi-supervised generative framework with deep learning features for high-resolution remote sensing image scene classification[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, 145: 23-43.
- [40] 巩彩兰, 胡勇, 尹球. 利用遥感图像实现城市不同类型住宅区自动识别的方法: CN200610118738.3 [P/OL]. (2007-05-09) [2023-12-04]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjye3e1UR7LPOTJEYnwC3FDeuNodFOjyUz1YLomeznt4TNFmmrY6xB4n8fZt6jDStc-3xFYV9V2ZCHSIMVpA5S1BhSjVFIK nKUTkpJ-XzssEv5JLcsF0kWIMCbfGbRT8IQ0nmTL6lK1KrgPmbpZbJsRNmjZLC3AXWAvxX6x7vxkPUg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- GONG Cailan, HU Yong, YIN Qiu. Automatic recognition of different types of urban residential areas using remote sensing images: CN 200610118738.3 [P/OL]. (2007-05-09) [2023-12-04]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=sAMp-nZqXjye3e1UR7LPOTJEYnwC3FDeuNodFOjyUz1YLomeznt4TNFmmrY6xB4n8fZt6jDStc-3xFYV9V2ZCHSIMVpA5S1BhSjVFIK nKUTkpJ-XzssEv5JLcsF0kWIMCbfGbRT8IQ0nmTL6lK1KrgPmbpZbJsRNmjZLC3AXWAvxX6x7vxkPUg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS>.
- [41] 廖邦固, 徐建刚, 宣国富, 等. 1947—2000年上海中心城区居住空间结构演变[J]. 地理学报, 2008 (2): 195-206.
- LIAO Banggu, XU Jian'gang, XUAN Guofu, et al. Evolution of residential space structure in Shanghai central city based on land use[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2008(2): 195-206.
- [42] YANG F, WEI Z, WANG J. Spatial scale plasticity of urban residential areas: lessons from Shanghai's model in response to COVID-19[J]. *Journal of Chinese Architecture and Urbanism*, 2023, 5(3): 1242.
- [43] 黄慧明, 周岱霖, 王焯. 基于居住形态类型的社区生活圈空间组织模式研究——以广州为例[J]. 城市规划学刊, 2021 (2): 94-101.
- HUANG Huiming, ZHOU Dailin, WANG Ye. An analysis of the spatial organization of community life-cycle under residential morphological categories[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(2): 94-101.
- [44] 庞云茜. 属性与关系的再认识——社会网络分析研究现状与演进[J]. 新闻与传播评论, 2019, 72 (3): 117-128.
- PANG Yunxia. Rethinking the relational data and attribute data: the status and development of social network analysis[J]. *Journalism & Communication Review*, 2019, 72(3): 117-128.
- [45] BARTHÉLEMY M. Spatial networks[J]. *Physics Reports*, 2011, 499(1-3): 1-101.
- [46] SCHLAPFER M, DONG L, O'KEEFFE K, et al. The universal visitation law of human mobility[J]. *Nature*, 2021, 593(7860): 522-527.
- [47] SMALL M L, ADLER L. The role of space in the formation of social ties[J]. *Annual Review of Sociology*, 2019, 45: 111-132.
- [48] MORO E, CALACCI D, DONG X W, et al. Mobility patterns are associated with experienced income segregation in large US cities[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4633.
- [49] 廖邦固, 徐建刚, 梅安新. 1947—2007年上海中心城区居住空间分异变化——基于居住用地类型视角[J]. 地理研究, 2012, 31 (6): 1089-1102.
- LIAO Banggu, XU Jian'gang, MEI Anxin. Evolution of residential differentiation in central Shanghai City (1947-2007): a view of residential land-use types[J]. *Geographical Research*, 2012, 31(6): 1089-1102.
- [50] 马国强, 赵静, 孙燕. 优质学区社区邻里交往特征及其社会空间效应——以南京市银城小学学区为例[J]. 地域研究与开发, 2022, 41 (1): 73-78.
- MA Guoqiang, ZHAO Jing, SUN Yan. Neighborly interaction characteristics and social-spatial effect of superior school district community: a case study of Yincheng Primary School district in Nanjing City[J]. *Areal Research and Development*, 2022, 41(1): 73-78.
- [51] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市居住区规划设计标准 (GB 50180-2018) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for residential buildings (GB 50180-2018) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [52] PERRY. City planning for neighborhood life[J]. *Social Forces*, 1928, 8(1): 98-100.
- [53] LUND H. Testing the claims of new urbanism - local access, pedestrian travel, and neighboring behaviors[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2003, 69(4): 414-429.
- [54] KAZMIERCZAK A. The contribution of local parks to neighbourhood social ties[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 109(1): 31-44.
- [55] CHIN C-H, CHEN S-H, WU H-H, et al. cytoHubba: identifying hub objects and sub-networks from complex interactome[J]. *BMC Systems Biology*, 2014, 8(s4): s11.
- [56] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [57] 艾伯特-拉斯洛·巴拉巴西. 巴拉巴西网络科学 [M]. 河南: 河南科学技术出版社, 2020.
- BARABASI A-L. Network science [M]. He'nan: He'nan Science and Technology Press, 2020.
- [58] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M, et al. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2004, 340(1-3): 388-394.
- [59] 任卓明, 邵凤, 刘建国, 等. 基于度与集聚系数的网络节点重要性度量方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62 (12): 522-526.
- REN Zhuoming, SHAO Feng, LIU Jianguo, et al. Node importance measurement based on the degree and clustering coefficient information[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(12): 522-526.
- [60] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community structure in social and biological networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(12): 7821-7826.
- [61] REDNER S. How popular is your paper? An empirical study of the citation distribution[J]. *European Physical Journal B*, 1998, 4(2): 131-134.
- [62] FORISTER M L, NOVOTNY V, PANORSKA A K, et al. The global distribution of diet breadth in insect herbivores[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(2): 442-447.
- [63] 王林, 戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. 西北工业大学学报, 2006 (4): 405-409.
- WANG Lin, DAI Guanzhong. On degree distribution of complex network[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006(4): 405-409.
- [64] BARABASI A L. Scale-free networks: a decade and beyond[J]. *Science*, 2009, 325(5939): 412-413.
- [65] 罗璇, 李如如, 钟碧珠, 等. 回归“街坊”——居住区空间组织模式转变初探[J]. 城市规划学刊, 2019 (3): 96-102.
- LUO Xuan, LI Ruru, ZHONG Bizhu, et al. From residential quarter to housing block: preliminary study on residential space transformation in China[J]. *Urban Planning Forum*, 2019(3): 96-102.
- [66] BATTY M. Planning the 21st Century city - four snapshots for a new science[J]. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 2021, 9(1): 1-9.
- [67] 叶锤楠. 流行病在城市空间中的传播模拟——以新型冠状病毒 (COVID-19) 疫情期间的武汉市主城区为例[J]. 南方建筑, 2021 (4): 1-7.
- YE Zhongnan. Simulation of epidemic spread in urban space: the case study of Wuhan central city during COVID-19[J]. *South Architecture*, 2021(4): 1-7.
- [68] 王元卓, 于建业, 邱雯, 等. 网络群体行为的演化博弈模型与分析方法[J]. 计算机学报, 2015, 38 (2): 282-300.
- WANG Yuanzhuo, YU Jianye, QIU Wen, et al. Evolutionary game model and analysis methods for network group behavior[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2015, 38(2): 282-300.
- [69] 孙国道, 杨雨璠, 潘翔, 等. 流行病数据可视分析综述[J]. 计算机学报, 2022, 45 (3): 601-623.
- SUN Guodao, YANG Yufan, PAN Xiang, et al. A survey on visual analysis of epidemic data[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2022, 45(3): 601-623.