

# 城市设计步行系统的网络连通性推演评估\* ——以北京长安街公共空间整体城市设计方案为例

A Network Connectivity Evaluation of Pedestrian System in Urban Design: A Case Study of Urban Public Space Design in Beijing Chang'an Street

师浩辰 赵渺希 赖彦君 周可斌 SHI Haochen, ZHAO Miaoxi, LAI Yanjun, ZHOU Kebin

**摘要** 在健康城市理念的影响下,慢行系统,尤其是步行系统逐渐成为许多城市规划和设计中不可或缺的重要部分。路径网络连通性作为步行系统的核心,其好坏直接决定了步行体验感与出行率。然而,当下在设计阶段对步行路径连通性的量化模拟推演评估方式较为片面,有待深入探索。以北京市长安街城市设计为例,通过复杂网络理论构建现状和规划步行网络模型,从连接的拓扑结构和空间尺度两个方面判断方案是否达到提升步行路径连通性这一设计目标。研究表明,相比现状步行网络,设计方案的多数评估指标有超2%的明显优化。此外,研究通过3个重点路段的比较分析,明确了不同设计目标和不同提升结果之间的逻辑对应关系和内在动力机制,并展望了复杂网络理论在设计阶段评估推演方案的可能性。

**Abstract** Under the impact of "Healthy City" concept, the slow traffic system, especially the pedestrian system has been gradually regarded as an essential part of urban planning and urban design. As the core of the pedestrian system, the quality of walkable path connectivity directly determines the feeling of walking experience and travel rate. Nevertheless, in the designing stage, quantitative simulation of walking path connectivity is to some extent one-sided and such issue remains a hard nut to crack. Thus, taking an urban design in Chang'an Street as an example, the paper constructs current and designed pedestrian network models through complex network theory, aiming at judging whether the scheme can achieve the goal of improving walking path connectivity from the perspectives of both topological structure and spatial scale. The results show that most evaluation indices of the designing scheme are optimized by more than 2% compared with current pedestrian networks. Furthermore, through the comparative analysis of three key street sections, the paper explores the relationship and internal dynamic mechanism between different design strategies and promotion consequences. Finally, the paper points out the prospect of linear path deduction evaluation in the design stage under complex network theory.

**关键词** 步行路径系统;连通性;复杂网络;城市设计;实施前评估

**Key words** pedestrian path network; connectivity; complex network; urban design; ex-ante evaluation

文章编号 1673-8985 (2022) 06-0057-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20220608

## 作者简介

### 师浩辰

华南理工大学建筑学院  
亚热带建筑科学国家重点实验室  
博士研究生

### 赵渺希 (通信作者)

华南理工大学建筑学院  
亚热带建筑科学国家重点实验室  
副系主任, 教授, 博士生导师  
arzhao@scut.edu.cn

### 赖彦君

华南理工大学建筑学院  
硕士研究生

### 周可斌

华南理工大学建筑学院  
博士研究生  
华南理工大学建筑设计院有限公司  
城市规划高级工程师

## 0 引言

在后疫情时代,如何构建畅行易达的步行交通网络是健康城市规划治理中不可忽视的课题<sup>[1]</sup>。据《柳叶刀》相关研究显示,提升步行空间的吸引力、可达性是促进城市居民

\*基金项目:广东省科技计划“基于大数据的城市商业游憩区(RBD)规划勘察技术集成应用”(编号2016A040403041)资助。

身心健康的重要举措<sup>[2]</sup>。步行友好的研究热度也在城市规划和公共健康领域居高不下<sup>[3-5]</sup>，许多规划项目在编制过程中已经逐步提高了对步行交通系统的重视程度，进一步加强了对步行出行人群的权益保障。

在既有研究中，连通性<sup>[6]616</sup>、可达性<sup>[7]</sup>、安全性<sup>[8]</sup>、土地利用混合程度<sup>[6]616</sup>等属性常被用来描述街道的可步行性，而步行网络连通性（network connectivity）作为其中最核心的指标<sup>[9]</sup>，本质上用以表征行人从起点到目的地的选择多样性，因而这一连通性越高，对缓解步行交通压力越有帮助。Handy等<sup>[10]</sup>将步行网络比作城市的毛细血管，并强调连通性是决定城市组织是否能健康生长的重要因素。Lee等、Kerr等在研究中指出，高连通度的步行网络和小尺度的街区不仅能有效地促成高出行率<sup>[11]</sup>，形成舒适宜人的步行体验<sup>[12]</sup>，还能满足以人为本视角下居民对步行环境的需求<sup>[13]</sup>。因此，在城市更新中，往往将提升街道连通性作为重要的规划手段，实现“小尺度、精准化、低代价、高效能”的设计目标。

当下，国内外学者测度步行网络连通性的方法较为多样，使用的指标包括但不限于交叉口密度、平均街区长度、街区面积、研究区域内应连通的节点数等<sup>[14-15]</sup>。在步行网络的拓扑分析中，这些传统度量指标的数据可直接从地理信息系统获取，在计算上有着简单、快速、可视化直观等优点。但值得注意的是，这些传统指标在网络特性的分析中存在着或大或小的局限性<sup>[16]59-61</sup>，若要更为精准地获知步行网络系统的设计评估效果，必须探寻新的技术方法。

近年来，由于信息技术的发展，一种具有海量节点和复杂连接拓扑结构的网络模型——复杂网络（complex network）被提出，给予了研究者新的拓扑视角和思路去量化和探究事物之间复杂的网络关系。复杂网络的理论源头最初可追溯到“哥德堡七桥问题”中的路径构建研究，具有典型的空间属性。得益于图论和拓扑学的发展，在20世纪60

年代，匈牙利著名的数学家Erdos和Renyi建立了ER随机图模型<sup>[17]</sup>，成为复杂网络的前身。后续Watts等<sup>[18]440-441</sup>、Newman等<sup>[19]</sup>改进了复杂网络理论，建立了小世界网络模型（small-world networks model），正式标志复杂网络理论基础的成型。由于复杂网络兼具小世界、无标度、抽象化和普适性等特征，使得许多学者以其为概念模型研究真实世界的网络变化，研究内容从基础科学的数学、物理学到应用科学的医学、城市网络等方面<sup>[20]15</sup>。广大交通学者通过海量研究发现，交通网络和其他网络一样，具有绝大多数复杂网络的结构性特征<sup>[21-22]</sup>，因而，复杂网络作为复杂系统的重要研究工具，对交通网络复杂性及其相关问题的研究具有指导性意义。Sheikh等<sup>[23]</sup>以复杂网络理论为基础，构筑街道网络模型并测度了其连接效率；刘承良等<sup>[24]426-433</sup>则进一步说明了复杂网络中的多项测度指标与网络连通性等空间结构特性的指证关系。从通行原理和形态结构上看，步行网络与交通网络具有高度的相似性，因此利用复杂网络理论来评估步行路径系统连通性是切实可行的，但现下还鲜有研究提及。

值得注意的是，上述提及的网络连通性评估大多数是基于现状，少部分是面向交通规划方案，这其中针对规划设计的实施前评估（ex-ante evaluation）<sup>[25]</sup>更是少之又少。事实上，作为判断规划/设计是否满足预期目标的核心判断依据，实施前评估是保障步行交通规划方案成功实施的必然条件。早在2003年，英国皇家财政部（HM Treasury）就将规划方案预估（appraisal）纳入中央政府发布的评估绿皮书中<sup>[26]</sup>。但是，由于缺少技术手段和评估准则，多数步行系统规划方案/设计的实施前评估（ex-ante evaluation）存在着或多或少的偏差。最重要的是，这类评估以定性分析为主，缺乏定量认知，对设计方案的验证与评价存在较大的误区<sup>[27]20-23</sup>。在此背景下，复杂网络的引入将有助于解决步行系统规划实施前评估定量分析不足的问题，借助这一工具，城市设计师可量化对比现状

和规划方案的多维度差异性，并以此为基础评判规划/设计是否达到预期效果，从而对项目预算、执行、结果、影响等一系列核心内容做出评估判断。

综上，本文选取步行网络连通性作为技术切入点，以北京市长安街城市设计方案为研究对象，基于复杂网络的量化分析手段，辨析设计前后的结构性差异和系统改善程度，以便及时弥补规划设计中的不足，为当前步行交通规划的实施前评估提供科学的技术支持。

## 1 研究对象与研究方法

### 1.1 研究对象及其规划目标

本文的研究对象选定为北京市长安街城市设计项目（全称为北京长安街及其延长线（复兴门至建国门段）公共空间整体城市设计及重要节点营造）。该项目目标是通过梳理景观和步行空间，力求打造两轴核心处，展现新时代大国首都风范的重要街道。在后续设计中，围绕该目标提出“政治性、文化性、国际性、人民性”4大规划愿景。其中，为回应“人民性”的设计目标和长安街现状步行路径现状相对割裂的态势，项目计划拓宽长安街步行空间，丰富步行路径系统，以增加人民活动空间。本次城市设计重点强调北京音乐厅、东单和建国门3个重要路段，研究后续将会基于复杂网络的评估结果对3个重要路段开展详细论述（见图1）。

值得注意的是，本次城市设计优化的重要目标之一是提升长安街的步行通达效率、丰富路径系统，因而步行路径连通性的优化成效成为本次设计的关注重点。理论上，路径连通性可被解读为通往目的地可达路径的数量和长度，分别衡量出发地和目的地之间步行路径的直接性程度和距离。高连通性的路径网络一般表现为栅格模式<sup>[28]1-5, [29-30]</sup>，其能够为途经长安街的行人提供更加直接及多元化的步行体验，创造更舒适的城市人居环境。



图1 长安街设计范围  
Fig.1 Design range of Chang'an Street

资料来源:笔者自绘。

## 1.2 既有研究方法的比较

近年来国内外度量连通性的指标可主要概括为路径的总量(包括数量和长度)、路径选择的多样性、路径的区块形态和走向,即街道网络总量、街道路径选择和街区地块形态3类<sup>[31]1-12</sup>。步行路径的连通性实质上表达了整体步行网络的拓扑特征,空间句法中的轴线模型(axial map)、线段模型(segment map),及从空间句法理论延伸出来的sDNA系统(Spatial Design Network Analysis,空间设计网络分析)是最常用以描述城市道路拓扑关系的量化模型(见表1)。其中,空间句法有着简单、易用的优点<sup>[32]1-3</sup>,但基于其选择度的计算原则,当存在多条最短路径时,算法经常采用随机性的分配方式,忽视了人的主观性。肖扬、宋小冬等通过实证得出,sDNA适用于尺度较大的车行空间,且在步行系统研究中无法综合考量道路宽度、街道业态等影响步道选择的因素<sup>[33], [34]22-24</sup>。Ratti<sup>[35]487-491</sup>认为在城市尺度较大、功能结构复杂的情况下,空间句法模型往往存在结果的偏差。因此在测度长安街步行系统的连通性时,空间句法、sDNA存在着一定的局限性。相比之下,由于弥补了传统图论在大规模分析中的不足,复杂网络被广泛地应用到多领域的系统结构与功能分析中。从研究案例的视角来看,复杂网络可将道路宽度、周边建筑出入口等对街道活动产生重要影响的要素纳入考量<sup>[36]48-51</sup>,相对真实地比对设计与现状的连通性,因而也更适合长安街步行系统连通性评估推演的应用场景。

## 1.3 研究方法

表1 步行网络中研究方法的比较  
Tab.1 Research method comparison of pedestrian path

研究方法	优点	缺点
空间句法 (space syntax)	简单、易用 <sup>[32]1-3</sup> ; 更适用于小尺度的城市空间研究	axial map 在较大的城市空间尺度中往往出现结果的偏差 <sup>[33]492-496</sup> ; 在选择度的计算原则中,当存在多条最短路径时,采用随机分配的原则,忽视了人的主观性; 与GIS的兼容性较差,进行大数据分析时运行稳定性较差; 仅针对街道网络这一单一要素进行分析,在步行系统分析中具有一定的局限性 <sup>[36]48-51</sup> ,无法考虑道路宽度、街道业态等影响因素对步行道路网络的影响
空间设计网络分析 (sDNA)	适用于较大尺度的车行空间 <sup>[34]22-24, [37]36</sup> ; 强调城市尺度下对偶拓扑与城市交通网络的整合和协同性 <sup>[34]24</sup>	在选择度的计算原则中,当存在多条最短路径时,推荐使用最短路径为最少转角角度的距离,未能综合考虑道路宽度、步行距离等影响步行路径选择的因素; 无法考虑街道业态、建筑出入口等影响步行活动的其他因素对步行道路网络的影响
复杂网络 (complex network)	能将两侧用地/建筑对街道活动产生的重要影响(如建筑物的出入口)反馈在网络分析结果中;还能考虑步行距离等非拓扑因素对步行者的影响 <sup>[37]37</sup>	在对人流数据拟合的测度中,拟合效果相对其他方法来说较差 <sup>[34]22-23</sup>

资料来源:笔者自制。

### 1.3.1 步行网络连通性的概念辨析

在复杂网络的视角下,连通性量化指标的内涵可集中表征于连接的拓扑结构和连接的空间尺度两个层面。其中,空间尺度主要反映了步行路径的总量,以表征步行网络的可利用性;拓扑结构则主要描述了距离加权下步行路径选择的多样性,可直接衡量规划区域内步行路径交叉口布局的好坏程度,二者综合可清楚地评估给定步行路径系统的可达、易达、快达的设计效果。特别地,这里的拓扑结构不是单纯的拓扑关系,而是加权了路径本身空间特征的拓扑关联。举例来说,假如给定节点A和B,两者有一条路径相连,那么拓扑关系上A与B的连接为1;与之相对,加权了空间特征的拓扑关联就需考虑到路径的长度、宽度等空间关系,连接就不再是1。

### 1.3.2 基于复杂网络的步行路径模型构建

如前文所言,复杂网络的结构特征与道路网络的形态特征具有高度的相似性<sup>[24]426, [38]</sup>,而作为与道路网络相类似的步行路径系统,其包含连通性在内的多项形态特征同样可以基于复杂网络模型进行抽象化概括和研究。复杂网络模型是由一有限个数的顶点(或

节点)和一组有限个数的连接(或边)组成的拓扑结构,通常表示为 $G=G(V, E)^{[18]441}$ 。其中,V代表顶点的集合,可表示为 $V=\{V_1, V_2, V_3, \dots, V_n\}$ ;E表示连接的集合,可由笛卡尔矩阵记法表示,即 $V \times V$ 。在构建步行网络模型的时候,需要注意两点:(1)复杂网络分为有向网络和无向网络两种,两者的拓扑结构和所对应的现实网络关系相差很大,需要根据具体情况加以辨析选择。(2)基于复杂网络构建路径系统的方法通常有两种:第一种是“对偶式”(dual approach),即以顶点代表路径,连接代表节点,一般用于研究路径流量问题;第二种是“通常式”,又称典型方法(prime approach),即以顶点代表节点,连接代表路径,一般用于研究路径网络的形态特征问题。考虑到文中的研究对象为步行路径系统,无明显的方向性,且本文研究的核心问题是连通性,故以无向网络为基础,采用第二种模式构建网络。

具体来说,本文将步行路径定义为网络中的连接(link),将路径交汇处定义为网络中的节点(node),构建整体的步行复杂网络系统(步行路径中一般情况构建见图2a;诸



如广场类的小型开敞空间依据其尺度大小在网络中可表达成图2b、图2c)。节点作为汇聚连接的对象,本质上对应现实空间中步行路径的交汇处,其部分特征的高低通常可反映出网络整体连接性的好坏。为了比较现状和规划的变化情况,笔者分别构建现状步行路径网络 $G_c$ (见图2a)和规划步行路径网络 $G_d$ (见图2b)。同时,考虑到现实步行路径网络中长度、宽度、过街设施和单位大院封闭性等要素的影响,本文对网络中连接的权重进行了一定的调整,以 $G_c$ 为例,首先,网络 $G_c$ 可以表征为由节点和连接组成的 $[l_{ij}]_{n \times n}$ 矩阵,其中 $l_{ij}$ 表示网络的连接, $i$ 和 $j$ 表示网络的节点。对于任意的连接 $l_{ij}$ ,其计算如公式(1)所示。

式中: $d_{ij}$ 代表了节点 $i$ 与 $j$ 之间的路径距离; $w_{ij}$ 代表了节点 $i$ 与 $j$ 之间路径的平均宽度; $\sigma$ 代表了所有的 $d_{ij}$ 标准差。考虑到 $d_{ij}$ 无限接近于0时, $l_{ij}$ 越趋近于常数而非无穷大,所以本文采用了高斯空间分布而非距离倒数来表征路径长度对网络的影响。这里的高斯空间分布是用来表征空间影响随空间距离变化的函数,源于统计学的正态分布,可应用在核密度估计、空间插值等多个算法中,是地理学中较为常见的空间统计模型之一<sup>[39]</sup>。本文特别将横跨车行道步行路径的权重设为0.5;将横跨单位大院内外路径的权重设为0.1,从而更加真实地体现物理空间上的半隔离状态(见表2)。

长安街最终构建的现状与规划步行网络模型如图3所示。

### 1.3.3 基于复杂网络特征的步行路径模型比较体系构建

当下,伴随复杂网络理论的发展,其度量体系也日趋成熟完善,其中拓扑关系、点度中心性、路径长度、群集性、网络密度、抗毁性、网络发育程度等统计量成为系统性的分析工具(见图4)<sup>[20]15-19</sup>。因此,与网络抗毁性(vulnerability)和鲁棒性(robustness)的分析方法类似<sup>[40]933-936</sup>,通过比较现状网络 $G_c$ 和规划网络 $G_d$ 关于连通性相关统计量的变化情况便可较为清晰地判断出步行路径的设计是否达到了提升连通性的目标。类似于Jiang

$$l_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}} \times w_{ij} & \text{情况1: 节点 } i \text{ 和 } j \text{ 的连接与车行网络无交叉} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}} \times w_{ij} \times 0.5 & \text{情况2: 节点 } i \text{ 和 } j \text{ 的连接与车行网络有交叉} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{d_{ij}^2}{2\sigma^2}} \times w_{ij} \times 0.1 & \text{情况3: 节点 } i \text{ 和 } j \text{ 的连接与车行网络无交叉, 且节点 } i \text{ 和 } j \text{ 分别位于单位大院的内外} \end{cases} \quad (1)$$

等、Yazdani等、刘承良等关于街道和水文网络的相关研究<sup>[24]427-428, [40]933-945, [41]</sup>,本文选取了度中心性、路径长度、聚集性和网络密度4个指标(见表3)来构建连通性比较评估体系。其中,度中心性、聚集性和网络密度3个指标用于测度连接的拓扑结构,路径长度则用于表征连接的空间尺度。这里以现状网络 $G_c$ 为例,详细说明各个统计量的概念和计算方式。下列4个统计量可划分为局部统计量(local)和全局统计量(global)。局部统计量是针对每一个节点测度,全局统计量则是评估整个网络。鉴于现状网络和规划网络在节点数和连接数上的差异,局部统计量将会以平均值来计入比较体系。

#### (1) 网络密度

网络密度 $Dn(G_c)$ (network density)是实际连接数与最大理论连接数的比值,反映的是网络的紧密程度,其值越高,则网络相对越紧凑,整体连接度越好。其计算公式为:

$$Dn(G_c) = \frac{2l}{N(N-1)} \quad (2)$$

式中: $N$ 为网络中节点的个数; $l$ 为网络中的连接数。

#### (2) 度中心性

度中心性(degree centrality)表征的是网络中给定节点与其他节点相连的连接数量,其值越大,表征该节点在网络中越重要,连接度越好。为了比较方便,本文后续采用度

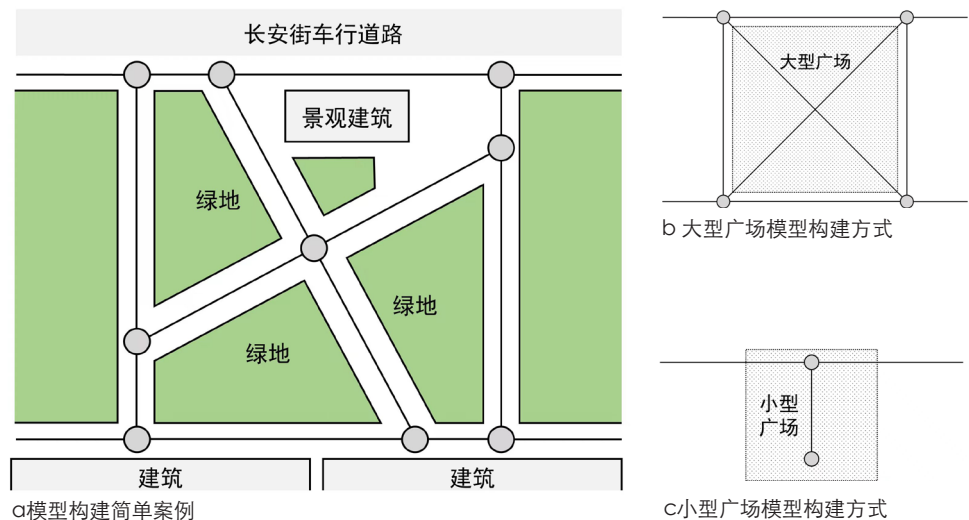


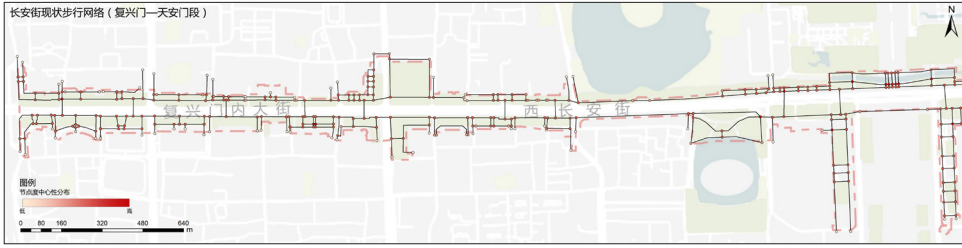
图2 步行路径网络的构建案例  
Fig.2 An example of building pedestrian network

资料来源:笔者自绘。

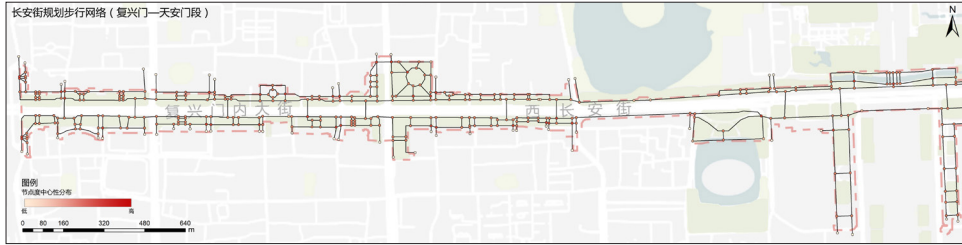
表2 规划与现状步行路径网络基本情况比较  
Tab.2 Comparison between current and designed pedestrian network

步行路径网络	节点个数	连接数	连接数与节点数的比值
现状步行路径网络 ( $G_c$ )	679	879	1.321
规划步行路径网络 ( $G_d$ )	725	1 027	1.417

资料来源:笔者自制。



a 长安街现状步行网络 (复兴门—天安门段)



b 长安街规划步行网络 (复兴门—天安门段)

图3 现状与规划步行路径网络模型 (复兴门—天安门段)

Fig.3 Complex network of current and designed pedestrian paths

资料来源:笔者自绘。

中心性的平均值 $De(G_c)$ 来表征整个网络的度中心性特征,其计算公式为:

$$De(G_c) = \frac{1}{N} \sum_i \sum_j l_{ij} \quad \text{如果节点 } i \text{ 和 } j \text{ 存在相连的连接} \quad (3)$$

式中: $N$ 为网络中节点的个数; $l_{ij}$ 为节点 $i$ 和 $j$ 之间的连接。

### (3) 聚集性

聚集性反映的是网络的集聚程度和紧密度,越紧密的网络意味着网络中节点与节点的连接度越好。聚集性一般可以用WS聚类系数 $C(G_c)$ (WS clustering coefficient)和传递性聚类系数 $T(G_c)$ (transitivity)两个指标来体现。其中,传递性聚类系数用于度量网络中闭合三元组(closed triad)的占比多少;而WS聚类系数被定义为各个节点局域聚类系数的平均值,局域聚类系数则基于单个节点度中心性和与之相邻节点之间的连接数计算,二者的计算公式分别为:

$$T(G_c) = \frac{3T_\Delta}{T_3} \quad (4)$$

$$C(G_c) = \frac{1}{N} \sum_i \frac{2M_i}{k_i(k_i - 1)} \quad (5)$$

式中: $T_\Delta$ 代表网络中闭合三元组的数量; $T_3$ 代表网络中所有三元组的数量; $N$ 为网络

中节点的个数; $k_i$ 代表节点 $i$ 的度中心性; $M_i$ 代表与节点 $i$ 相连的相邻节点之间的连接数量。WS聚类系数和传递性聚类系数的范围均是 $[0,1]$ ,且特征均为越靠近1,代表网络越紧密,连接度越好;反之,越接近0,代表网络越松散,连接度越差。

### (4) 路径长度

路径长度反映的是网络规模,规模越大意味着网络越松散,节点与节点的连接度相对越差。路径长度可以由最长最短路径 $L(G_c)$ (longest shortest path)和平均路径长度 $A(G_c)$ (average length path)两个指标来体现,二者的计算公式分别为:

$$L(G_c) = \text{MAX}(d_{\min}(i, j)) \quad (6)$$

$$A(G_c) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{ij} d_{\min}(i, j) \quad (7)$$

式中: $d_{\min}(i, j)$ 表示节点 $i$ 和节点 $j$ 的最短路径长度; $N$ 为网络中节点的个数。

## 2 长安街步行路径设计的连通性评估

### 2.1 步行路径连通性的整体评估

依据前文所述评估体系,连通性的整体评估结果可见表4。首先,从连接的拓扑结构角度看,网络密度、度中心性和聚集性3个

测度指标均显示出规划的巨大优化作用。其中,网络密度整体提升了2.47%;度中心性平均值整体提升了9.42%;而聚集性包含的WS聚类系数和传递性聚类系数分别提升了140.53%和135.68%。这一系列变化表明设计后的路径节点与节点间连接的路径更加丰富,网络的整体性更强,连接性更好。除去关注全局统计量,从各个节点度中心性的分布情况同样可以说明网络的优化情况(见图5),相比现状分布,规划峰值右侧的分布明显更多。换言之,规划网络中度中心性大的节点数量更多,借由这些度大的节点可以将整个网络的连通性变得更强。值得注意的是,与度中心性和聚集性相比,网络密度提升的值并不大,原因有两方面:(1)规划相比现状增加了连接数(879至1027)的同时也增加了节点数(679至725),根据网络密度的算法(见公式(2)),分母的增加一定程度上稀释了分子的增量;(2)规划相比现状更侧重于部分路段路径丰富性的提升,因此对于核心算法更聚焦于局部的度中心性和聚集性,其提升状况会比相对整体的网络密度更加明显。从网络尺度角度看,路径长度指标下包含的最长最短路径降低了0.62%,平均最短路径降低了1.68%。这意味着规划路径网络相比现状更加紧凑,节点与节点间连接的长度变得更短,行人可以更快地从一个节点步行至另一个节点,节点的联系度更强,整体连通性更好。

总体而言,长安街规划步行路径系统(见图6)相比现状基本完成了既定的设计目标,而完成这些目标所采用的设计策略同样可以通过既有的评估系统进行一定程度上的解释。首先,设计整合了部分地区的步行路径,让原本相对单调的步行空间变得多样化。以路段A为例,设计增加了数条横向斜向路径(见图7a),从网络模型视角来看强化了步行路径网络的路径连接情况,一方面使该区域度中心性平均值提升了14.2%(2.428至2.777),WS聚类系数由0提升至0.0926,一定程度上增加了网络的局部聚集性;另一方

表3 步行路径比较评估体系

Tab.3 Evaluation system comparison of pedestrian path

评估层面	评估指标	二级评估指标	统计量特征
连接的空间尺度	路径长度	最长最短路径 $L(G_c)$ (longest shortest path)	全局统计量
		平均路径长度 $A(G_c)$ (average length path)	全局统计量
连接的拓扑结构	聚集性	WS 聚类系数 $C(G_c)$ (WS clustering coefficient)	局域统计量
		传递性聚类系数 $T(G_c)$ (transitivity)	全局统计量
		网络密度 $Dn(G_c)$	全局统计量
		度中心性 $De(G_c)$ (degree centrality)	局域统计量

注:表中的局域统计量均计算平均值来表征整个网络。

资料来源:笔者自制。

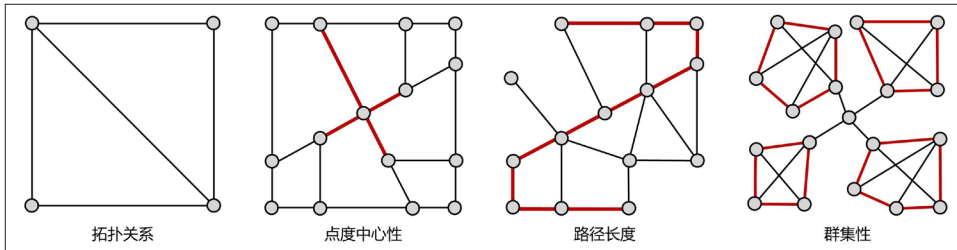


图4 复杂网络的统计量

Fig.4 The indices of complex network

资料来源:笔者自绘。

表4 步行路径设计连通性评估结果

Tab.4 The evaluation result of the connectivity of pedestrian path design

比较对象	节点个数 / 个	连接数 / 个	网络密度	度中心性 平均值	最长最短路径 / m	平均最短路径 / m	WS 聚类系数	传递性聚类系数
现状	679	879	0.00382	2.59	31 921.96	11 722.73	0.0155	0.0204
规划	725	1 027	0.00391	2.83	31 725.52	11 525.49	0.0372	0.0481
提升比例 / %	6.77	16.84	2.47	9.42	-0.62	-1.68	140.53	135.68

资料来源:笔者自制。

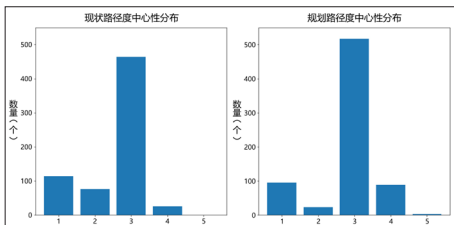


图5 步行路径网络节点度中心性分布

Fig.5 The distribution of degree centrality in pedestrian path network

资料来源:笔者自绘。

面使整个绿地的步行路径体系较现状变得更加富有趣味,区域的步行空间变得更加宽敞。其次,设计将部分现有的大院围墙打开。以路段B为例,围墙打开后,部分半封闭步行路径变得开敞(见图7b)。因此在构建模型时,公式(1)中分段函数的情况3将会变为情况1,有效减少了加权情况下单位大院内外步行路

径节点间的距离,使该区域的网络尺度相较现状变得更加紧凑,连通性也更好;同时,得益于大院空间的开放,街道两侧公共空间互相拓宽,设计也相应地增加了行人过街的路径,弱化了车行道路对步行路径网络的割裂。最后,设计将部分大院的行车入口后置。以路段C为例,后置的行车空间有效增加了长安街两旁的步行空间,丰富了步行路径系统的同时也减少了车行流线与步行网络的交叉(见图7c)。从网络模型视角来看,变化的本质是变更了公式(1)中分段函数的情况,有效减少了加权情况下原车行入口两侧步行路径节点间的距离。

## 2.2 重要路段连通性的评估

得益于规划步行路径方案的整体优化,

重点设计路段(见图8)的连通性相较现状也存在一定幅度的提升,但提升的结果却略有不同。由于节选的重点路段均是整体网络的一部分,本文特别选取了局域统计量进行前后比较,具体评估结果可见表5。相比整体网络的提升结果,东单段的提升效果较差,其中WS聚类系数仅为全段的37%,而度中心性平均值为全段的60%;建国门段的提升效果与长安街整体网络相仿,各项指数都在均值上下浮动;相对地,北京音乐厅段的提升效果十分明显,度中心性平均值的前后变化接近均值的2倍(WS聚类系数因对方格网路径不敏感故未增加)。从网络理论来说,这些不同提升效果背后的原因在于构成网络基本元素(即路径和节点)数量变化的差异,而这种差异正是由于设计方案对不同路段的异质化处理所导致的。换言之,尽管3个重点路段连通性提升结果存在着不同,但归结到核心仍然遵守“设计目标—设计方案—方案评估结果”的逻辑关系,即不同设计目标导致的异质化提升结果。

从北京音乐厅段来看,设计方案认为现状步行环境的最大问题是步行体验感差。由于受到西城区司法局单层建筑的影响,音乐厅前的步行空间显得过于逼仄压抑。尽管现有联通两端的步行路径,但宽度不够难以给予行人相对舒适的步行体验感(见图9)。基于此,音乐厅段的设计目标被定为“改善步行环境,增加步行路径”,所采取的方式是将现有司法局的单层建筑搬迁,拓宽、平移和增加部分步行路径(见图10, A、B段),缓解因道路和原有建筑带来的空间分隔(见图10中红色路径)。从网络理论角度而言,设计在基本维持现状步行路径网络拓扑结构特征的基础上,改变了网络中部分节点和路径的位置,增加了3条新的连接并修整了已有网络中连接的权重。总的来说,方案较现状变得更加多样,局域整体连通性变得更好(见表5)。值得注意的是,因该节点网络尺度较小,所以提升的效果相对也较为明显,此外因拓扑结构特征未改变,WS聚类系数也未发生变化。





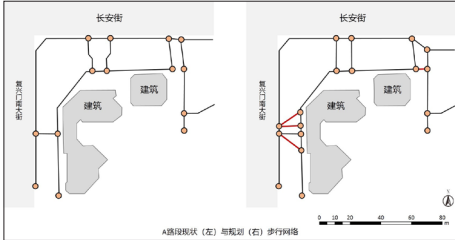
图6 案例路段位置  
Fig.6 Location of cases



图8 重要路段位置  
Fig.8 Location of critical areas

资料来源: 笔者自绘。

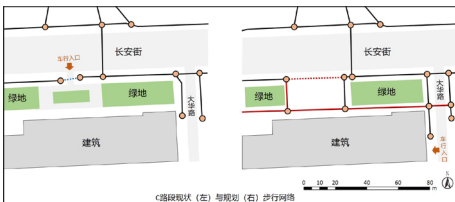
资料来源: 笔者自绘。



a 路段A  
注: 红色实线代表新增路径。



b 路段B  
注: 蓝色虚线表示半封闭路径, 红色实线代表新增路径。



c 路段C  
注: 蓝色虚线表示与车行交叉路径, 红色虚线代表移除交叉后的路径, 红色实线代表新增路径。

图7 路段A、B、C的步行网络  
Fig.7 Pedestrian network of case A, B and C

资料来源: 笔者自绘。

从东单段来看, 得益于早期的街道和建筑前绿地设计, 现状步行路径系统本身较为完善, 连通性也尚可, 但部分地区的存在过于冗杂迂回的现象, 导致步行体验感一般, 有待提升。基于此, 规划拟定的设计目标是“尊重现有路径走向, 简化部分区域路径体系, 增加通达性”。所采取的方式是在保证原有路径框架的情况下调整部分区域的步行路径和节点, 以“微调整”的方式优化部分地区的步行网络。以图11中的A区域来说, 原



图9 北京音乐厅段现状  
Fig.9 Current situation of Beijing Concert Hall Area

资料来源: 笔者自绘。

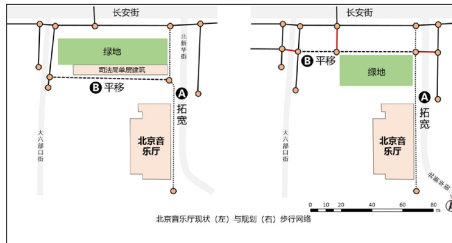


图10 北京音乐厅段步行网络  
Fig.10 Pedestrian network of Beijing Concert Hall Area

资料来源: 笔者自绘。

有路径系统为了景观的趣味性设置了步行环岛, 但是无形中增加了步行路径的迂回性, 不利于穿行, 因而设计方案移除了步行环岛, 形成了直达穿行的“X”字型步行网络, 变相增加了路径的通行性。从网络角度来看, 东单段的设计删繁就简, 以优化路径连接情况和缩小网络尺度为目的去除了部分节点和连接, 优化了步行路径; 同时也间接改变了部分区域现状步行路径系统的主要拓扑结构, 使得WS聚类系数有一定程度的提升(见表5)。总的来说, “微调整”的设计策略基本奏效, 但因囿于现状整体框架, 导致网络连通性优化的结果低于整体路段。

与东单段不同, 尽管建国门段现状步行路径系统本身较为完整, 但存在诸如迂回性太

强、硬质空间太少、连通性不足等问题, 需要一定规模的调整。基于此, 建国门段的设计目标被定为“充分利用开敞空间, 重新梳理步行路径体系, 增加慢行道路的通达性”, 所采取的方式是对现有路径体系进行重整和再设计, 利用诸如拓宽路径、裁弯取直、增加硬质空间等手法减少路径的迂回程度。以建国门绿化广场为例(见图12中的A区域), 现状“Y”字形的路径被修整为“T”字型, 且每条路径在设计方案中都有拓宽。此外, 设计也在“T”字型的交叉处设置了一处硬质铺地空间, 划分出2条新的步行路径。从网络理论角度而言, 建国门段的设计是对现状步行网络拓扑结构的一次重置, 通过重塑节点和连接, 从优化路径连接和缩小网络尺度两个方面重新构筑一个更连通、更顺畅的步行路径网络。这点也可以反映在该路段度中心性平均值和WS聚类系数相较于整体路段的优化结果上(见表5)。

### 3 结论与讨论

当下, 在健康城市和人本规划理念的双重影响下, 慢行系统被认为是规划设计尤其是城市设计项目的重中之重<sup>[147-49]</sup>。而步行网络的连通性成为评判慢行系统设计好坏的核心因素之一<sup>[621-622]</sup>。然而一方面由于现有连通性评估方法的局限性<sup>[659-61]</sup>, 另一方面由于实施前评估(即设计阶段评估)相对参差不齐的现状<sup>[27]20-23</sup>, 尽管设计阶段步行网络的量化模拟评估意义重大, 但是其研究进程一直相对停滞。因此, 本文以长安街城市设计为例, 通过复杂网络这一拓扑模型方法, 构筑起现状( $G_c$ )和规划( $G_p$ )的步行网络模型, 通过不同系数的差异回答“设计是否提升了步行网络连通性”这一核心命题。具体来说, 本

文首先根据连接的拓扑结构和空间尺度下数个网络测度指标的变化(多数产生超2%的优化),发现规划方案相比现状其步行网络有明显提升这一事实,并通过网络理论来解读设计策略带来的路径优化的核心原因。其次,笔者比较了北京音乐厅段、东单段和建国门段3个重要路段与整体优化结果的好坏,通过更加细致的解读来回答“设计目标—设计策略—路径优化”之间的内在逻辑关系和量化对应,为后续基于复杂网络的城市设计路径的系统评估打下理论基础。

总的来说,本文是基于复杂网络理论对城市设计方案实施前评估的一次有益探索,为后续包括步行路径在内的众多线性系统的设计阶段评估提供了一种新的量化测度思路和评价方法,补足了当前城市设计方案推演的不足。然而在长安街的设计方案中,仅考虑连接性一项指标是为了解决现状步行系统破碎和连接性差的突出问题,但提升通行能力

仅仅是步行友好城市建设的基础环节,未来应更关注和重视市民的环境偏好、安全和舒适性等心理感受,响应我国以人为本的发展要求,从而塑造健康、便捷、宜人的城市居住环境。

(致谢:本文为第9届金经昌城乡规划研究生论文竞赛佳作论文,感谢后续审稿专家和《上海城市规划》编辑部为本文提出的宝贵修改意见。)

参考文献 References

[1] 雷诚,李锦,丁邹洲.“双效健康城市”理念下既有公共空间环境更新设计探讨——以金鸡湖环湖绿道为例[J].西部人居环境学刊,2020,35(3):1-9.  
LEI Cheng, LI Jin, DING Zouzhou. Explorations on

the existing urban public space renewal design in the concept of double-effect healthy city: a case study of Jinji Lake[J]. Journal of Human Settlements in West China, 2020, 35(3): 1-9.  
[2] STEVENSON M, THOMPSON J, DE SA T H, et al. Land use, transport, and population health: estimating the health benefits of compact cities[J]. The Lancet, 2016, 388(10062): 2925-2935.  
[3] CERVERO R, DUNCAN M. Walking, bicycling, and urban landscapes: evidence from the San Francisco Bay Area[J]. American Journal of Public Health, 2003, 93(9): 1478-1483.  
[4] FRANK L D, ANDRESEN M A, SCHMID T L. Obesity relationships with community design, physical activity, and time spent in cars[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2004, 27(2): 87-96.  
[5] HANDY S L, BOARNET M G, EWING R, et al. How the built environment affects physical activity: views from urban planning[J]. American Journal of Preventive Medicine, 2002, 2(2): 64-73.  
[6] GRASSER G, VAN DYCK D, TITZE S, et al. Objectively measured walkability and active transport and weight-related outcomes in adults: a systematic review[J]. International Journal of Public Health, 2013, 58(4): 615-625.  
[7] MCCORMACK G R, SHIELL A. In search of causality: a systematic review of the relationship between the built environment and physical activity among adults[J]. International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity, 2011, 8(1): 1-11.  
[8] PIKORA T, GILES-CORTI B, BULL F, et al. Developing a framework for assessment of the environmental determinants of walking and cycling[J]. Social Science & Medicine, 2003, 56(8): 1693-1703.  
[9] 滕爱兵,韩竹斌,李旭宏,等.步行和自行车交通系统评价指标体系[J].城市交通,2016,14(5):37-43,55.  
TENG Aibing, HAN Zhubin, LI Xuhong, et al. Evaluation system for pedestrian and bicycle transportation[J]. Urban Transport of China, 2016, 14(5): 37-43, 55.  
[10] HAND S, PATERSON R G, BUTLER K S. Planning for street connectivity: getting from here to there[J]. APA Planning Advisory Service Reports, 2003(515): 1-75.  
[11] KERR J, FRANK L, SALLIS J F, et al. Urban form correlates of pedestrian travel in youth: differences by gender, race-ethnicity and house-hold attributes[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2007, 12(3): 177-182.  
[12] LEE C, MOUDON A V. The 3D's+R: quantifying land use and urban form correlates of walking[J]. Transportation Research Part D, 2006, 11: 204-215.  
[13] MOUDON A V, LEE C, CHEADLE A D, et al. Attributes of environments supporting walking[J]. American Journal of Health Promotion, 2007, 21(5):

表5 重要路段连通性评估结果比较

Tab.5 Comparison of the connectivity of evaluation results between selected areas on Chang'an Street

路段	比较对象	节点数 / 个	连接数 / 个	度中心性平均值	WS 聚集系数
北京音乐厅段	现状	9	10	2.33	0.0000
	规划	11	13	2.71	0.0000
	提升比例 /%	—	—	19.38	—
东单段	现状	54	71	2.73	0.0860
	规划	46	67	2.89	0.1050
	提升比例 /%	—	—	5.86	59.09
建国门段	现状	20	30	2.80	0.0410
	规划	30	47	3.07	0.1060
	提升比例 /%	—	—	9.60	158.54
整体路段	现状	679	879	2.59	0.0155
	规划	725	1 027	2.83	0.0372
	提升比例 /%	—	—	9.42	140.53

资料来源:笔者自制。

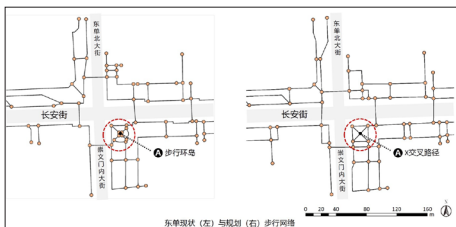


图11 东单段步行网络  
Fig.11 Pedestrian network of Dongdan Area

资料来源:笔者自绘。

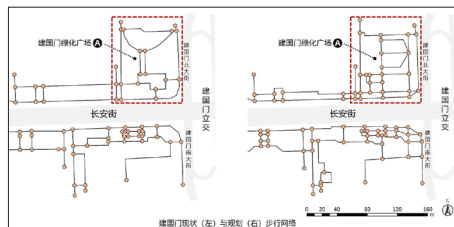


图12 建国门段步行网络  
Fig.12 Pedestrian network of Jianguomen Area

资料来源:笔者自绘。



- 448-459.
- [14] EWING R, CERVERO R. Travel and the built environment[J]. *Journal of the American Planning Association*, 2010, 76(3): 265-294.
- [15] MAGHELAL P K, CAPP C J. Walkability: a review of existing pedestrian indices[J]. *URISA Journal*, 2011, 23(2): 5-19.
- [16] 赵月, 杜文, 陈爽. 复杂网络理论在城市交通网络分析中的应用[J]. *城市交通*, 2009, 7(1): 57-65. ZHAO Yue, DU Wen, CHEN Shuang. Application of complex network theory to urban transportation network analysis[J]. *Urban Transport of China*, 2009, 7(1): 57-65.
- [17] ERDOS P, RENYI A. On the evolution of random graphs[J]. *Publications of the Research Institute for Mathematical Science*, 1960, 5: 17-60.
- [18] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks[J]. *Nature*, 1998, 393(6684): 440-442.
- [19] NEWMAN M E J, WATTS D J. Scaling and percolation in the small-world network model[J]. *Physical Review E Statistical Physics, Plasmas, Fluids, & Related Interdisciplinary Topics*, 1999, 60(6 Pt B): 7332-7342.
- [20] 刘亮. 复杂网络基元研究方法及应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2018. LIU Liang. *Complex network building blocks methods and applications*[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2018.
- [21] VITO L, MASSIMO M. Is the Boston subway a small-world network?[J]. *Physica A*, 2002, 314: 109-113.
- [22] KALAPALA V, SANWALANI V, CLAUSET A, et al. Scale invariance in road networks[J]. *Physical Review E Statistical, Nonlinear & Soft Matter Physics*, 2005, 73(2 Pt 2): 026130.
- [23] SHEIKH A Z M, RAJABI M A. Analyzing the effect of the street network configuration on the efficiency of an urban transportation system[J]. *Cities*, 2013, 31: 285-297.
- [24] 刘承良, 余瑞林, 曾菊新, 等. 武汉城市圈城乡道路网的空间结构复杂性[J]. *地理科学*, 2012, 4(2): 426-433. LIU Chengliang, YU Ruilin, ZENG Juxin, et al. Complexity of spatial structure on the urban-rural road network in Wuhan metropolitan area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 4(2): 426-433.
- [25] CHADWICK G A. *System view of planning*[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd, 1978.
- [26] UK Government. *The green book: appraisal and evaluation in central government*[R]. 2013.
- [27] 杨帆, 孙晖, 王帅. 基于GIS的我国城市规划实施评估模式研究[J]. *规划师*, 2015, 31(z2): 20-24. YANG Fan, SUN Hui, WANG Shuai. Mode study of implementation evaluation of China's urban planning based on GIS[J]. *Planners*, 2015, 31(z2): 20-24.
- [28] RANDALL T A, BAETZ B W. Evaluating pedestrian connectivity for suburban sustainability[J]. *Journal of Urban Planning and Development*, 2001(3): 1-15.
- [29] SAELENS B E, SALLIS J F, FRANK L D. Environmental correlates of walking and cycling findings from the transportation, urban design, and planning literatures[J]. *Annals of Behavioral Medicine*, 2003, 2(25): 80-91.
- [30] OWEN N, CERIN E, LESLIE E, et al. Neighborhood walkability and the walking behavior of Australian adults[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2007, 33(5): 387-395.
- [31] 雷京. 城市街区物质环境对步行出行的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015. LEI Jing. *The effect of urban blocks physical environment on walking*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [32] HILLIER B, HANSON J. *The social logic of space*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [33] 肖扬, 李志刚, 宋小冬. 道路网络结构对住宅价格的影响机制——基于“经典”拓扑的空间句法, 以南京为例[J]. *城市发展研究*, 2015, 22(9): 6-11. XIAO Yang, LI Zhigang, SONG Xiaodong. Estimating the value of street layout via local housing market: an empirical study of Nanjing, China[J]. *Urban Development Studies*, 2015, 22(9): 6-11.
- [34] 宋小冬, 陶颖, 潘洁雯, 等. 城市街道网络分析方法比较研究: 以Space Syntax、sDNA和UNA为例[J]. *城市规划学刊*, 2020(2): 19-24. SONG Xiaodong, TAO Ying, PAN Jiewen, et al. A comparison of analytical methods for urban street network: taking space syntax, sDNA and UNA as examples[J]. *Urban Planning Forum*, 2020(2): 19-24.
- [35] RATTI C. Space syntax: some inconsistencies[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 2004, 31(4): 487-499.
- [36] 魏皓严, 李璐. 步行网络形态对比研究[J]. *西部人居环境学刊*, 2015, 30(5): 47-52. WEI Haoyan, LI Lu. Comparative analysis of the pedestrian network configuration[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2015, 30(5): 47-52.
- [37] 肖扬, CHIARADIA A, 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.
- [38] LIU G, LI Y, LI Z, et al. Cartographic generalization of urban street networks based on gravitational field theory[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2014, 28(20): 1450133.
- [39] 陶卓霖, 程杨. 两步移动搜寻法及其扩展形式研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 589-599. TAO Zhuolin, CHENG Yang. Research progress of the two-step floating catchment area method and extensions[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(5): 589-599.
- [40] YAZDANI A, JEFFREY P. Robustness and vulnerability analysis of water distribution networks using graph theoretic and complex network principles[C]//12th Annual Conference on Water Distribution Systems Analysis. Tucson, 2011: 933-945.
- [41] JIANG B, CLARAMUNT C. Topological analysis of urban street networks[J]. *Environment & Planning B: Planning and Design*, 2004, 31(1): 151-162.