

# 基于“形态—网络—功能”的城市韧性评估方法\* ——以十堰市中心城区为例

Assessment of Urban Resilience Based on the Perspective of "Form-Network-Function": A Case Study of the Central City of Shiyan

颜文涛 李子豪 付磊 YAN Wentao, LI Zihao, FU Lei

**摘要** 科学评估城市空间组织模式对城市韧性水平的影响,可以为国土空间规划中有效增强城市应对风险能力提供理论支撑。基于景观生态学与复杂网络理论,我们提出了“形态—网络—功能”的多维度城市韧性评估框架和定量计算方法。通过评估十堰市中心城区的4种土地利用情景的韧性水平,分析影响城市韧性水平的关键空间特征并提出相应规划对策。研究发现,各空间指标对韧性水平的影响是复杂非线性关系。不同情景下,要素间的组织模式与互动关系的差异影响韧性水平。研究结果表明,高生态连通性的城市空间形态、具有层级结构体系的城市道路网络、多模块协同的公共服务功能体系可以有效提升城市韧性水平。

**Abstract** In territorial spatial planning, assessing the impact of spatial characteristics of various elements on urban resilience can provide theoretical support for enhancing urban resilience effectively. Based on landscape ecology and complex network theory, a multi-dimensional urban resilience assessment framework and a quantitative method of "form-network-function" are proposed. By comparing the differences in the resilience levels of four land use scenarios in the central city of Shiyan, key spatial characteristics affecting the resilience level of the city are analyzed and corresponding planning countermeasures are proposed. It is found that the influence of each spatial indicator on the resilience level is a complex non-linear relationship, and the organization pattern and interaction between elements affect the resilience level of different scenarios. The research results suggest that urban spatial forms with high ecological connectivity, urban road networks with hierarchical structure systems, and multi-module synergistic public service function systems can effectively improve the level of urban resilience.

**关键词** 城市韧性评估;城市形态;城市网络;城市功能;十堰市

**Key words** urban resilience assessment; urban form; urban network; urban function; Shiyan City

文章编号 1673-8985 (2023) 01-0001-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20230101

## 作者简介

### 颜文涛

同济大学建筑与城市规划学院  
自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室  
教授,博士生导师

同济大学生态智慧与生态实践研究中心

副主任, yanwt@tongji.edu.cn

### 李子豪

同济大学建筑与城市规划学院

博士研究生

### 付磊

上海同济城市规划设计研究院有限公司

城市设计研究院 副院长,教授级高级规划师

## 0 引言

在气候变化和快速城市化背景下,极端天气事件、人为事故风险和系统日常波动频繁发生,严重影响城市居民的正常生活,甚至造成生命财产损失、社会秩序失衡等灾难性后果<sup>[1-3]</sup>。简单依赖工程防御措施的传统防灾方式,难以应对当代城市正面临的日益增长、成因复杂的各类冲击与扰动<sup>[4]</sup>。在此背景下,城市韧性理念逐渐引起学界与城市管理者的广泛重视,强调通过城市各系统的合理规划、设计、管理与协作,具备抵抗、吸收、转变、适应等能力,积极

主动地应对扰动,最大程度地保障城市功能的正常运行<sup>[5], [6][2], [7]</sup>。

国土空间是自然资源与人类活动的基本载体,也是实现城市韧性目标的物质基石<sup>[8]</sup>。为有效应对未来不确定性风险扰动的威胁,韧性发展理念已成为国土空间规划编制中的战略要点与工作原则。2020年9月发布的《市级国土空间规划编制指南》(试行)提出“增强城市韧性和可持续发展的竞争力”的目标,并以此为导向对空间格局、公共服务、基础设施等提出明确编制要求。2021年《国土空间规划

\*基金项目:国家“十三五”重点研发计划课题“面向城市复杂系统与多种扰动的韧性城市理论体系”(编号2020YFB2103901);国家自然科学基金面上项目“沿海城市洪灾韧性的表征测度、影响机制与规划调控研究”(编号52178048)资助。

城市体检评估规程》中强调统筹发展与安全,将“城市安全韧性”作为重要维度提出多项评估指标。

通过空间规划的手段,优化用地布局与空间形态,塑造具有适应与转变能力的空间组织模式,可以有效提升城市应对灾害时的存续能力<sup>[9-10]</sup>。纵观现有城市韧性相关研究,主要围绕概念内涵<sup>[6][50]</sup>、理念范式<sup>[12]</sup>、风险评估<sup>[13]</sup>、管理措施<sup>[14-15]</sup>等方面展开,为提高城市韧性水平提出相应的策略建议。但现有韧性目标下的空间规划实践依然面临较多的知识缺口。研究对象上,目前聚焦国土空间功能韧性的研究甚少,空间要素分布及其相互作用关系对城市韧性的影响尚不明确;在实践路径中,韧性目标大多抽象化、概念化,缺乏成熟明确的国土空间韧性评估技术路径,难以直接形成对城市空间规划的指导与约束。因此,本文借助景观生态学理论及复杂网络分析工具,面向国土空间规划,解析城市形态、网络、功能的韧性内涵,提出相应定量评估城市韧性水平的方法。以湖北省十堰市为研究对象,测度其现状及不同规划方案的韧性水平,以期将韧性理念融入空间规划实践提供借鉴路径与建设启示。

## 1 研究思路与评估方法

### 1.1 总体思路

城市空间的物质形态、功能属性和交互联系形成了城市复杂的运行机制和组织模式,对城市韧性水平具有至关重要的影响。城市空间既是各类扰动的主要承灾体,也是各项城市功能的地理载体。理想的的城市空间组织模式可以有效吸收或适应扰动,通过多空间要素的协同与关联作用有效维持城市正常运行,以保障城市居民的日常生活。由于城市空间涵盖多元要素间的复杂位置关系,传统对空间关系及其组织模式特征的刻画方法难以定量分析其对韧性水平的影响。

为此,本文将城市空间组织模式分解为形态、网络、功能3个维度,以“形态—网络—功能”三位一体的方式评估城市韧性(见图1)。该框架基于以下逻辑展开:首先,城市形态关

注城市建成环境与生态空间的耦合关系,若生态空间的连通性下降,则生态系统调节能力被削弱,致使城市面对各种扰动时缺乏缓冲空间,难以消解灾害强度而造成巨大损失。其次,城市空间网络是城市建成环境内各个空间之间交互联系的渠道,支撑城市的要素流动与正常运转。韧性的空间网络具有较强的抗毁性与转化力,可以快速吸收扰动并维持网络性能,而不良的空间网络在扰动下可能会快速崩溃。最后,城市中的功能性场所是空间网络中要素流动的驱动节点,引导空间之间的交互关系。维持城市功能的安全运行、保障居民的正常生活状态是城市韧性的终极目标。即使具有相同的空间形态与网络组织,结合城市中不同的功能联系和供需关系,韧性水平依然可能存在显著差异。三者相互约束、层层递进,反映了自然环境、要素流动与功能组织之间的融合性。通过对多种土地利用情景的量化解析与对比研究,能够有效解释城市整体空间组织对韧性水平的影响机制,为提升城市韧性水平的空间规划提供方法支撑。

### 1.2 城市形态韧性评估方法

城市形态是指城市物质空间环境及其各类功能的布局形式与组织结构,有广义与狭义之分<sup>[16]</sup>。本文所探讨的城市形态属于狭义范畴,指城市建成环境中各类空间要素的分布格局与几何特征。一方面,城市化的快速推进导致城市建设用地日趋紧凑且向外蔓延,破碎的城市生态空间阻碍了景观单元间的要素流动与能量交换,削弱了诸如调蓄雨洪、缓解热岛、吸收污染、净化水体等生态系统服务能力,大大增加了风险发生的可能性<sup>[4][9]</sup>、<sup>[17]</sup>;另一方面,建成环境人口规模大、建设强度高、要素流动频繁,面对各类扰动时的脆弱性高,易造成大规模、连锁性的社会经济损失。因此,在高密度集中建设区内优化城市形态,形成均衡布局的绿地与开放空间,可保障城市具备利用自然生态系统减缓灾害冲击并及时转变适应的能力,从而增加城市韧性。

根据景观生态学中的“源—汇”理论,城

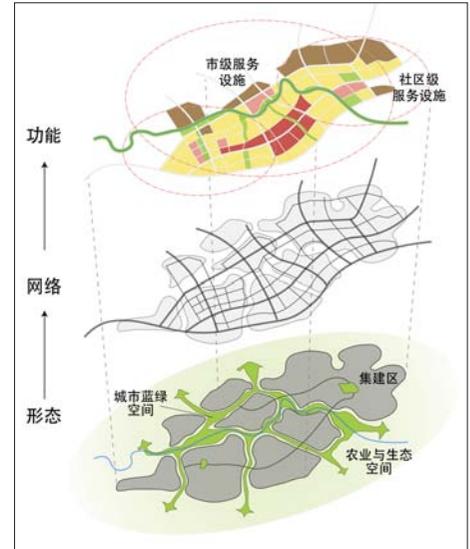


图1 城市“形态—网络—功能”的关系

Fig.1 The relationship between "form-network-function"

资料来源:笔者自绘。

市景观可以分为“源”“汇”两种基本类型<sup>[18]</sup>。其中,“源”景观为城市建设用地,具有生态负效应;“汇”景观为城市绿地、林地与水域,可减缓生态负效应的发展。在城市建成区范围内,计算每一个“源”栅格到最近“汇”栅格的距离的平均值,定义为平均距离指数 $R_d$ ,表征城市建成区的形态韧性。平均距离指数越大,则说明“源”与“汇”的空间耦合性越弱,生态空间与建设用地的布局形态较难形成稳定的生态系统服务供需流动关系,城市韧性也相应越低。公式如下:

$$R_d = \frac{\sum_{i=1}^m \min(d_{ij})}{m} \quad (1)$$

$$(i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n)$$

式中: $d_{ij}$ 为“源”栅格 $i$ 到“汇”栅格 $j$ 的欧式距离, $m$ 、 $n$ 分别为“源”栅格和“汇”栅格的数量。

### 1.3 城市网络韧性评估方法

依据城市系统基本构成单元之间的流动特征,可以将实体空间属性抽象为由“节点”与“联系”组成的空间网络。在城市尺度中,道路交通网络通常被视为城市空间的基本骨架,其形态、密度、层级关系属性影响城市功能

间的相互作用关系和潜在交互成本,也对城市韧性水平具有至关重要的影响<sup>[19][11], [20]</sup>。基于上述考虑,选用全局效率(global efficiency)反映网络拓扑结构中流动要素的运行能力和效率,高韧性水平的结构可以在扰动过程中最大程度地维持其运转效率。计算公式为:

$$E = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in V_s} \frac{1}{d_{ij}^{min}} \quad (2)$$

式中:  $N$ 为初始网络节点数,  $i, j$ 表示网络节点,  $V_s$ 为网络节点的集合,  $d_{ij}$ 表示 $i, j$ 之间的网络最短路径长度。

设计“随机移除”与“排序移除”两种扰动场景,分别以随机顺序或中介中心性顺序,依序每次移除城市道路网络中1%的“边”,直至所有“边”全部被移除。“随机移除”模拟不确定扰动对网络某些“边”的无差别破坏,可仿真地震、洪水等突发自然灾害或交通拥堵等日常系统波动场景。“排序移除”模拟针对网络关键“边”的蓄意攻击,引起网络连通性的快速降低,可仿真恐怖袭击、军事战争等人为破坏场景。

在扰动场景下,计算道路网络平均全局效率的变化率 $Q(p)$ ,即移除网络“边”比例 $p$ 后的网络全局效率 $E_{post}$ 与原网络全局效率 $E_{pre}$ 的比值,表征受到扰动后道路网络性能的变化<sup>[19][4]</sup>。绘制网络平均全局效率的变化率 $Q(p)$ ,随移除网络“边”比例 $p$ 变化的关系曲线。借鉴复杂网络的渗流理论,识别网络第二大连通子图规模从大变小的转折点,此时网络的整体连接性能出现突变。将该转折点定义为网络的崩溃点 $p_{max}$ ,对应的全局效率变化率 $Q(p_{max})$ 定义为网络可承受的性能波动。最后通过计算崩溃点前,性能变化曲线与可承受性能波动的合围区域面积,表征城市网络的韧性水平 $R_n$ 。计算公式为:

$$Q(p) = E_{post}/E_{pre} \quad (3)$$

$$R_n = \int_0^{p_{max}} Q(p) dp - p_{max} \cdot Q(p_{max}) \quad (4)$$

#### 1.4 城市功能韧性评估方法

从“以人为本”的视角出发,城市韧性

应关注扰动过程中公共服务功能的高效稳定运行,最大程度地维持居民健康有序的生活状态,减少扰动对居民生活的影响<sup>[21]</sup>。在流网络的视角下,城市功能供需匹配过程是通过网络中的“流”完成的<sup>[22-23]</sup>。居民在城市中获取公共服务,可以理解为以流动要素为介质,在空间网络中建立起的“居民—服务”交互过程。服务供应量、供需路径、居民获取服务的成本与效率等指标在时空上的变化,可反映扰动对城市服务功能水平的影响程度,即反映城市的功能韧性水平。借鉴引力模型,计算空间网络中任一“居住—服务”点对间的服务功能强度 $f_{ij}$ ,加和后除以居住用地与公共服务用地的总面积之积,得到城市服务功能水平 $F$ 。

$$f_{ij} = S_i S_j \frac{d_{ij}^{Eucl}}{d_{ij}} \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{\sum S_i \sum S_j} \sum_{i \in V_r} \sum_{j \in V_s} f_{ij} \quad (6)$$

式中: $S_i, S_j$ 分别为居住用地 $i$ 与公共服务用地 $j$ 的用地面积,  $d_{ij}^{Eucl}$ 表示 $i, j$ 之间的欧式距离,  $d_{ij}$ 表示 $i, j$ 之间的网络最短路径长度。

同样设计“随机移除”与“排序移除”两种扰动场景,计算城市服务功能水平的变化率 $S(p)$ ,即移除网络“边”比例 $p$ 后的服务功能水平 $F_{post}$ 与原服务功能水平 $F_{pre}$ 的比值,表征受到扰动后城市服务性能的变化。计算服务性能变化曲线随移除网络“边”比例 $p$ 的积分,表征城市服务功能的韧性水平 $R_f$ 。计算公式为:

$$S(p) = F_{post}/F_{pre} \quad (7)$$

$$R_f = \int_0^p S(p) dp \quad (8)$$

## 2 十堰市中心城区多情景韧性评估

### 2.1 研究区域与情景设定

#### 2.1.1 研究区域特征

十堰市地处湖北省西北部汉江中上游,北抵秦岭,南依巴山,汉江和武当山横贯全境,境内丹江口水库是南水北调中线工程水源地。作为国家级重点生态功能保护区,十堰市在生物多样性保育、水源涵养、水质保持等方面承担

重要的区域生态功能。十堰市目前正处于快速城镇化阶段,早期为寻求城市快速发展,建设用地侵占生态空间的现象突出,生态系统服务能力被显著削弱。

本文以十堰市主城区为研究范围,其位于市域中北部,总面积767.98 km<sup>2</sup>。其中,建设用地主要分布于南部低山浅丘地区和北部汉江沿岸。城区内部建设用地与山体空间交融,形成独特的山地城市形态特征。特殊的地形特征与气象条件使得十堰市自然灾害多发频发,韧性城市建设迫在眉睫。

#### 2.1.2 土地利用情景设定

依据十堰市第三次全国国土调查结果、十堰市城市总体规划(2015—2030)、十堰市国土空间总体规划(2020—2035)过程稿,本文设定4种土地开发利用情景:(1) 2020年土地利用现状(S1);(2)“2015版总规”方案(S2);(3)国土空间规划方案1(S3);(4)国土空间规划方案2(S4)。其中,S2方案的规划期至2030年,S3、S4方案的规划期至2035年(见图2)。

在用地布局上,3种规划情景新增建设用地的策略存在差异:S2方案在建成区外围低山丘陵拓展若干团块状城市片区,利用山体绿隔形成多组团格局;S3方案对城市东西两翼组团形态进行调整,部分新增建设用地顺应河谷延伸;S4方案强化城市沿河谷发展的树枝状格局,提高建成区内的保留山地丘陵比例,建设用地形态更显“不规则”。在路网形态上,S2方案采用“小街区、密路网”策略,在建成区内形成高密度、均质网格状的城市支路;S3、S4方案均采取了局部加密路网的建设策略,但新增路网形式存在不同:S3方案多梳理原有的自由生长道路使之连通,S4方案则多依据地块形态新建自由格网状路网。

### 2.2 多方案韧性评估结果分析

#### 2.2.1 景观生态系统的形态韧性

对比4种情景中建设用地规模与生态空间规模的变化(见表1),可以看出为适应十堰市的未来发展需求,S2、S3、S4这3种规划情

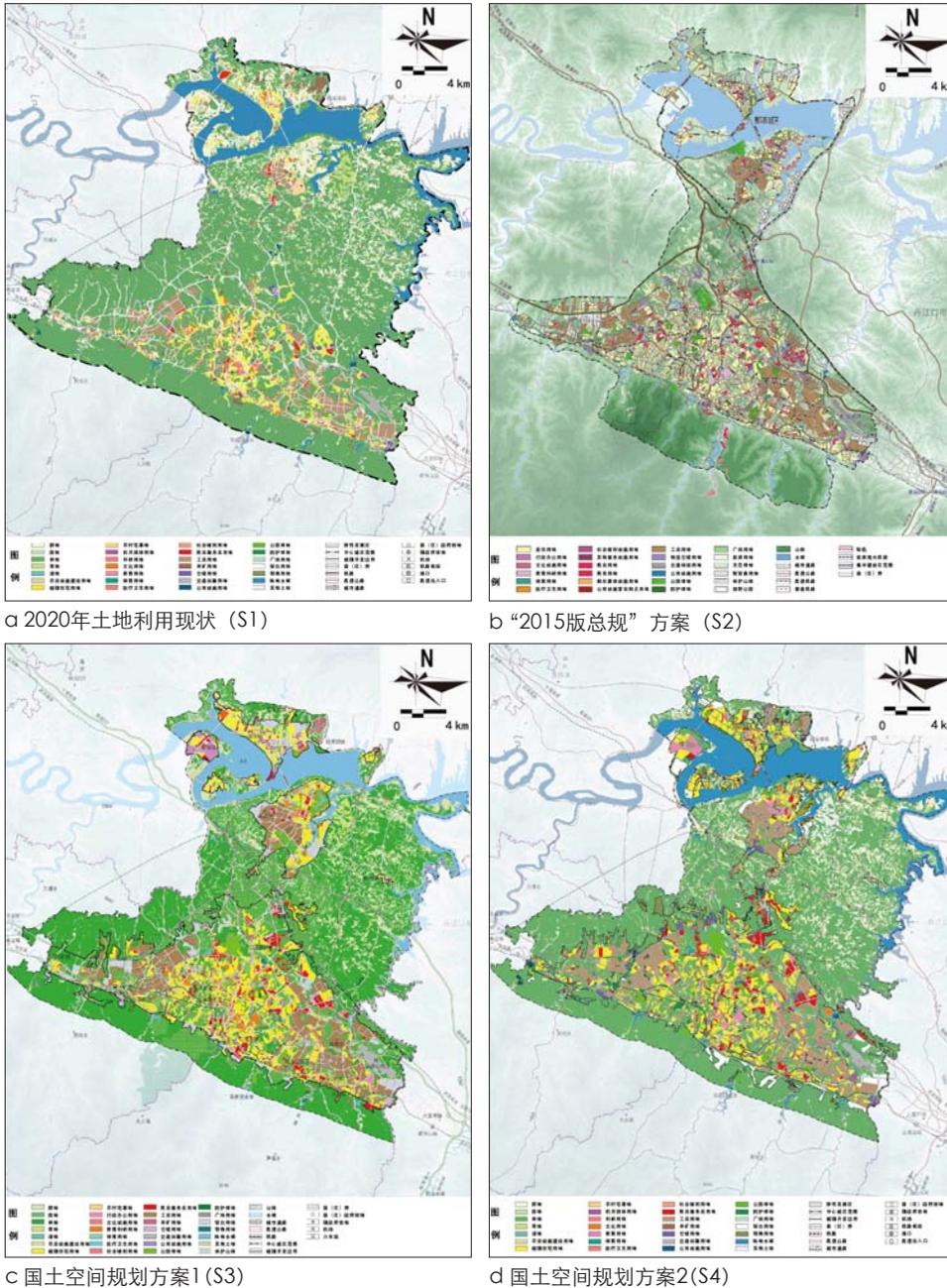


图2 4种土地利用情景  
Fig.2 Four land use scenarios

资料来源:第三次全国国土调查和各阶段规划成果(非最终方案)。

表1 4种土地利用情景的用地规模与形态韧性指数

Tab.1 Land-use scales and morphological resilience indices for four land use scenarios

指标	S1	S2	S3	S4
城市建设用地规模/km <sup>2</sup>	128.93	151.17	196.92	189.14
生态空间规模/km <sup>2</sup>	527.56	486.20	437.35	444.82
形态韧性指数	111.56	151.11	141.85	91.34

资料来源:笔者自制。

景中,建设用地规模均较S1现状情景有较大幅度的增加,生态空间规模则有不同程度的减少。其中, S3情景的城市建设用地规模最大,

为196.92 km<sup>2</sup>,增长幅度达到52.7%。

从形态韧性测度结果来看, S4情景的形态韧性水平最高,“源一汇”景观的平均距离

指数为91.34;S2情景的形态韧性水平最低,“源一汇”景观的平均距离指数为151.11。形态韧性水平从高至低依次为S4、S1、S3、S2,与生态空间规模的排序并不相同。S4情景虽然在生态空间规模上相较于S1现状情景有所减少,但是形态韧性水平却优于现状,城市发展形态得到优化。同样, S2情景的建设用地规模小于S3情景,但S2情景的形态韧性仍然弱于S3。

### 2.2.2 道路交通系统的网络韧性

从道路网络基本指标可以看出(见表2), S2情景中道路网络密度最高,达到6.41 km/km<sup>2</sup>,平均路段长度也明显低于其他3个情景。规划中通过缩小地块面积,增加交叉口数目,整体呈现为“小街区、密路网”的城市道路网络模式。S3、S4情景的道路网络平均路段长度则与S1现状情景接近,路网密度则通过规划得以显著提高,整体表现为在现状道路网络格局上的局部梳理与连通。

“随机移除”模拟下(见图3),4种情景道路网络崩溃阈值点与网络韧性水平的结果均表现为S4情景最高, S1情景最低,由高至低排序依次为S4、S2、S3、S1。3种规划情景S2、S3、S4的韧性水平均远高于现状情景S1。其中, S2情景与S4情景的道路网络韧性水平接近, S3情景则相对较低。S3、S4两种情景的街道网络密度、原始网络全局效率均接近,网络性能的下陷速度也趋同,但S3情景在受到随机扰动后,网络的破碎化趋势明显快于S4情景,即网络崩溃阈值点低,使得S3的韧性水平相对较低。与S4情景相比, S2情景中虽然道路网络密度更高,但韧性水平却仍稍逊于S4情景。

“排序移除”模拟下(见图4),网络崩溃阈值与韧性水平均显著低于“随机移除”的模拟结果。4种情景中,除现状S1情景网络崩溃阈值为5%外,3种规划情景S2、S3、S4的网络崩溃阈值均为8%,说明在各规划场景中,中介中心性居前8%的主干结构为维系城市道路网络效率发挥着极为关键的作用。对比4种情景的韧性水平,与“随机移除”模拟结果排

表2 4种土地利用情景的道路网络结构特征

Tab.2 Structure characteristics of road networks for four land use scenarios

指标	S1	S2	S3	S4
路段数/条	1 948	4 448	2 775	2 650
交叉口数/个	1 460	2 758	1 835	1 773
平均路段长度/m	472.59	362.42	494.62	485.25
集建区路网密度/(km/km <sup>2</sup> )	3.66	6.41	5.45	5.11

资料来源:笔者自制。

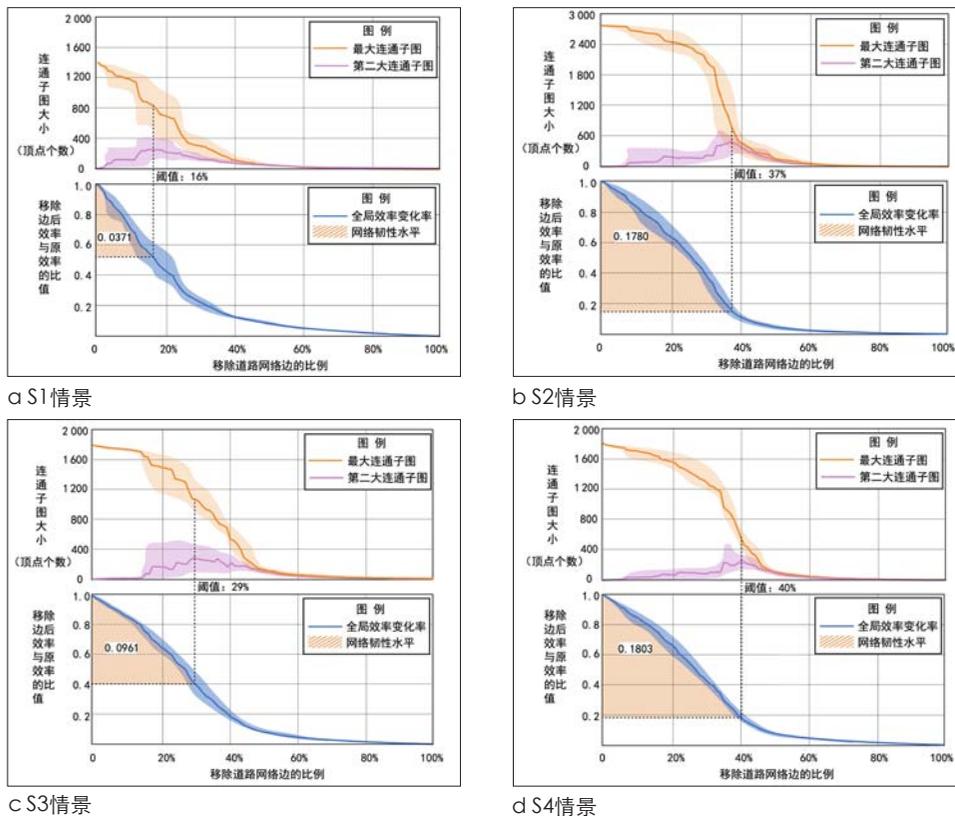


图3 “随机移除”模拟下4种土地利用情景的道路网络韧性水平测度

Fig.3 Resilience measurement result of road network for four land use scenarios under random failure mode

资料来源:笔者自绘。

序相同,由高至低依次为S4、S2、S3、S1。分析各情景街道网络性能变化曲线,可以看出S4情景中较为明确的多个下降折点,S2、S3情景存在下降折点但并不显著,而S1情景完全不存在这一特征。说明S4情景相较于其他各情景,道路网络结构的层次结构更加清晰,应对“排序移除”时的韧性水平也相应更高。

### 2.2.3 公共服务系统的功能韧性

“随机移除”模拟下(见表3),4种情景的城市服务功能韧性水平由高至低排序结果为S2、S4、S3、S1,其中3种规划情景S2、S3、S4的韧性水平接近。现状S1情景在移除“边”比

例达到12%后,服务性能出现断崖式下降,早于道路网络的崩溃阈值(16%)。说明目前十堰市的公共服务功能韧性较差,在街道网络受到扰动后,城市公共服务功能难以维持。主要原因是现有服务设施集中分布于中心城区南部的老城片区,而其他片区的服务设施建设相对滞后。对比不同规划情景的评估结果,S2情景的服务功能韧性水平最高,移除“边”比例在20%—30%之间时,其性能下降速度明显慢于S3、S4。

“排序移除”模拟下(见表3),4种情景城市服务功能韧性水平由高至低排序结果为

S4、S2、S3、S1,其中S2、S4情景的韧性水平接近,S3情景的韧性水平略次,现状S1情景的韧性水平仍为最低。但相较于“随机移除”模拟结果,现状S1情景与3种规划情景的差距减小,表现为各规划方案并未显著提高“排序移除”模拟下的城市功能韧性。主要原因是重要的公共服务设施选址依赖于交通可达性,在道路网络中具有高中心性的路段往往意味着更高的可达性,从而使服务功能中心与高中心性道路网络的空间重叠,导致其应对排序移除时的高脆弱性。

比较分析功能韧性与网络韧性的评估结果,城市公共服务功能韧性特征具有两个特点。第一,城市服务功能韧性水平与道路网络的韧性水平具有一致性。整体来看,在两种扰动模拟中,功能韧性水平排序与道路网络韧性排序大致相同,表现为S2、S4情景的韧性水平均优于S3、S1情景的韧性水平。唯一例外的是,在“随机移除”模拟中,S2情景的道路网络韧性水平虽低于S4情景,但服务功能韧性水平却相对更高。说明“小街区、密路网”的城市道路网络可以通过提供更多冗余路径以保障公共服务供需空间的连通,从而更好地维持“随机扰动”情境下的城市服务功能。第二,同一情景中城市服务性能的变化趋势快于网络效率变化趋势。当移除相同的道路网络“边”比例时,城市服务性能的维持能力始终低于网络效率的维持能力,在“排序移除”模拟中这一特征更加显著。主要原因是城市公共服务功能的空间分布存在不均衡与单中心特征,一旦部分连通重要公共服务设施的路段失效,往往会对城市的整体功能运行产生巨大影响。

### 2.2.4 “形态—网络—功能”韧性的综合评估

通过形态、网络与功能韧性的组合,可评估不同土地利用情景的综合韧性水平。整体上看,在网络韧性与功能韧性层面,规划情景S2、S3、S4均通过路网结构优化、设施布局调整等措施,显著提高了十堰市现状的韧性水平。但在形态韧性层面,规划情景S2、S3的建设用地布局与城市形态可能会导致城市韧性水平的进一步降低。

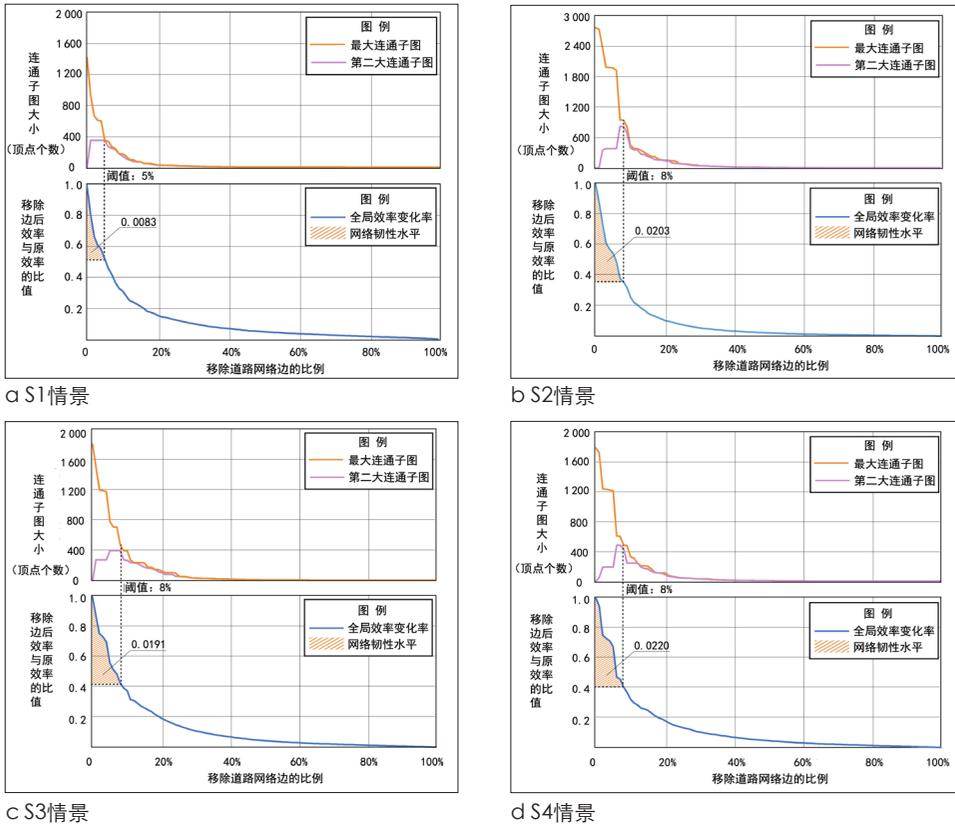


图4 “排序移除”模拟下4种土地利用情景的道路网络韧性水平测度

Fig.4 Resilience measurement result of road network for four land use scenarios under selective failure mode

资料来源:笔者自绘。

表3 4种土地利用情景公共服务功能韧性水平测度

Tab.3 Resilience measurement result of public services for four land use scenarios

随机移除模拟		排序移除模拟	
S1情景	0.1697	S1情景	0.0392
S2情景	0.2778	S2情景	0.0623
S3情景	0.2500	S3情景	0.0578
S4情景	0.2564	S4情景	0.0636

资料来源:笔者自制。

对比不同情景的各项韧性水平排序结果发现, S4情景除“随机移除”模拟下的公共服务功能韧性水平外, 其各项韧性水平的排序均位列第一, 综合韧性水平最高; 现状S1情景除形态韧性外, 其余各项韧性水平的排序均位列最末, 综合韧性水平最低; S2、S3两

种情景的综合韧性水平居中。S2情景团块状扩张的城市用地布局导致其形态韧性远差于其他情景, 但“小街区、密路网”的道路网络特征使其在面对“随机移除”情景时, 网络韧性与功能韧性水平较优, 表现出较强的适应能力。S3情景虽然用地规模、道路网络密

度与S4情景均较为接近, 但各项韧性水平均低于S4情景。

### 3 提升城市韧性水平的规划对策

#### 3.1 重塑高生态连通性的城市空间形态

传统规划设计中往往认为, 随着城市规模的扩大, 生态空间被建设行为蚕食, 自然环境过程被破坏, 进而造成城市韧性水平的下滑。然而, 本研究发现, 在城市建设用地规模合理增长的前提下, 城市建设用地规模增加与城市形态韧性之间并不是线性的负相关关系, 并不必然导致城市脆弱性加强。例如, 相较于现状S1情景, S4情景不仅建设用地规模有所扩大, 而且城市形态韧性水平也得到提高。对中小型城市而言, 在一定规模阈值下, 良好的城市布局可减少城市规模扩大的“负效应”, 仍可有效保障城市的安全韧性。而根据S3、S4情景的形态韧性评估结果, 可见在相近的城市用地规模下, 不同的城市空间形态结构也具有不同的韧性水平。

顺应生态空间格局, 保护自然生态过程, 形成山水城林交融的城市形态, 可有效提高城市的形态韧性水平。对比4种情景的建设用地布局形态, 可以看出: 目前十堰市适宜城镇建设的土地资源紧张, 生态空间与城市绿地逐渐破碎化与孤岛化。S4情景延续十堰市树枝状的发展格局, 利用自然山体在城市组团间形成绿楔与绿隔, 主动营造建设用地与生态空间的高耦合关系, 基于自然解决途径提升风险调节能力, 从而增强城市形态的韧性水平。反观S2、S3情景, 虽然同样保护了重要的生态空间, 但建设用地的填充式扩张趋势明显, 即使看似是“多中心、组团式”的紧凑发展, 也可能导致城市形态韧性下滑。

#### 3.2 完善具有层级结构体系的城市道路网络

通常认为高密度路网意味着更高的冗余度与灵活性, 可以更好地适应扰动影响以提高城市韧性水平<sup>[24]</sup>。因此, 规划中常将提高道路网络密度作为提升城市韧性的重要策略。本文中S2、S3、S4这3种规划情景提高道路网络

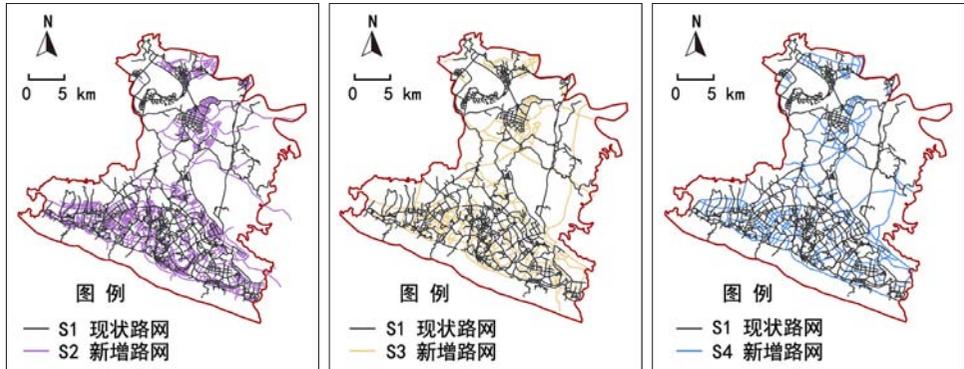
密度的同时,其韧性水平确实也同样得到提升。然而,与传统认知不完全一致的是, S2情景的道路网络密度最高,但面对两类扰动模拟时,其道路网络韧性水平却逊于S4情景。S3、S4情景的道路网络密度接近,但S4情景的道路网络韧性水平却远高于S3情景,在“随机移除”模拟下两者的差距尤为突出。

以上结果表明,提高道路网络密度并非提升城市网络韧性的充分条件,街道网络的形态与层级同样影响城市网络韧性水平。对比3种规划情景的新增道路网络形态,其规划策略存在差异(见图5)。S2情景均质加密路网, S3情景强化原有自由生长道路的连通性, S4情景新增自由格网以形成若干主干路网。依据道路网络韧性的测度结果,层级结构有序、网络密度适中的格网型城市街道网络在面对两类扰动时,具有较高的韧性水平。另外,依据城市公共服务功能韧性的测度结果,高密度的城市街道网络在面对随机扰动时,更容易提供连通公共服务供需空间的冗余路线。

总体来看,由于城市道路网络具有尺度多维、要素叠加的特点,城市道路网络的韧性特征具有尺度效应。在宏观尺度中,建设具有格网特征的主干道路体系形成多级层次结构,有利于提升城市整体交通网络的结构抗毁性;而在中微观尺度中,城市中心区局部适当提高路网密度,强化其与主干路网之间的跨层级衔接,可以有效保障公共服务流动的功能适应能力。

### 3.3 搭建多模块协同的公共服务功能体系

在空间网络视角下,城市公共服务功能向高中心性空间聚集,是居民流动与资源要素配置的必然结果。高等级公共服务设施布局于高交通可达性的地区,可以在城市受扰动时提供及时、高效的服务<sup>[25]</sup>。但从S2、S3、S4这3种规划情景功能韧性的分析结果来看,同一空间上网络结构与服务功能的高度中心化同样具有显著的负边际效应。如果城市服务供需流动高度依赖于强中心性路段,一旦这些路段在扰动情景下失效(接近于“排序移除”),网络中其他道路无法有效重新分配交通量,将导致居



a S2情景

b S3情景

c S4情景

图5 3种规划情景的新增路网

Fig.5 Additional roads in three planning scenarios

资料来源:笔者自绘。

民的获取服务大幅减少,严重影响城市韧性水平。

提升城市服务设施的冗余性与均好性,部分疏散中心城区的公共服务设施,形成模块化的公共服务设施布局体系,已经成为规划实践中的共识。但是,规划中静态的设施模块化布局,也可能难以避免现实中动态的服务供需流动极化。加密城市道路以提高交通可达性,会进一步加强公共服务设施密集的传统中心城区的服务吸引力,在客观上引导居民长距离获取服务。上述研究表明,若外围地区公共服务设施规模不足、居住用地分散,则难以通过规划显著提高城市服务功能韧性。尤其当服务设施或主干路网恰好布局于灾害风险区域时,城市公共服务体系将会迅速崩溃瓦解。

理想的公共服务设施布局应形成高效可达、分层交互、便捷转化的多模块协同模式。常态下在组团单元内部提供与居住人口相匹配的公共服务,通过适当加密路网,可以满足居民在日常功能半径内的服务需求。与此同时,依托高中心性的主干路网,保障城市居民便捷前往中心城区的高等级公共服务设施连通性。采用引力模型可以得出,上述布局结构可使公共服务的供需匹配呈现幂律特征,即短途出行满足大多数公共服务的需求,辅以少量长途出行的补充,不同层级的城市公共服务之间可以有序转化。城市在面对排序移除时,不会因少

量设施失效而出现大规模崩溃;在面对随机移除时,又可以通过主干网络迅速转化供需流动方向,形成适灾结构,从而具有更强的功能存续能力。

## 4 结论

形态、网络与功能是城市空间组织的基本特征,提出城市形态、网络和功能的韧性评估方法,可为国土空间规划中合理安排各类用地布局提供指导。本文基于景观生态学与复杂网络理论,提出“形态—网络—功能”的多维度城市韧性评估框架和定量计算方法,在国土空间规划中融入安全韧性目标,提供多方案量化比选的技术途径。

以十堰市中心城区的现状和3种规划方案为实证对象,分别计算其形态、网络、功能的韧性水平,进而通过对比分析,识别影响城市韧性水平的关键空间特征。主要结论如下:(1)城市建设用地规模增加与城市形态韧性之间为非线性负相关关系,提高建成环境与生态空间的连通性可减少城市规模扩大的“负效应”;(2)城市宏观尺度上层级结构有序、中微观尺度上网络密度适中的格网型城市街道网络,应对扰动时具有更强的适应与转化能力;(3)高韧性的公共服务设施布局,可以在保持高效可达的基础上具有层级交互、多模块化特征,促使公共服务供需路径呈现幂律特征。

本文所讨论的形态、网络、功能属于城市

物质空间范畴,是城市韧性的重要基础。未来可以从以下几个方面进行拓展:将评估框架推广到不同规模、不同地理特征的城市,进一步解析城市空间组织特征与韧性的影响机制;针对城市面临的典型扰动,设置具体灾害影响场景并分析其韧性的动态演化过程;与经济流动、人口分布、社会组织等因素结合,帮助合理规划安排空间与社会资源,提高城市应对各类灾害的适应能力。■

## 参考文献 References

- [1] AHERN J. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 341-343.
- [2] PIETRAPERTOSA F, SALVIA M, DE GREGORIO HURTADO S, et al. Urban climate change mitigation and adaptation planning: are Italian cities ready?[J]. *Cities*, 2019, 91: 93-105.
- [3] 汪光焘. 城市:40年回顾与新时代愿景[J]. *城市规划学刊*, 2018 (6): 7-19.  
WANG Guangtao. Chinese cities: review of 40 years' development and visions in the new era[J]. *Urban Planning Forum*, 2018(6): 7-19.
- [4] LIAO K H. A theory on urban resilience to floods—a basis for alternative planning practices[J]. *Ecology and Society*, 2012, 17(4): 48.
- [5] 杨敏行,黄波,崔翀,等. 基于韧性城市理论的城市灾害防治研究回顾与展望[J]. *城市规划学刊*, 2016 (1): 48-55.  
YANG Minxing, HUANG Bo, CUI Chong, et al. Review and prospect: urban disaster resilience[J]. *Urban Planning Forum*, 2016(1): 48-55.
- [6] 邵亦文,徐江. 城市韧性:基于国际文献综述的概念解析[J]. *国际城市规划*, 2015, 30 (2): 48-54.  
SHAO Yiwen, XU Jiang. Understanding urban resilience: a conceptual analysis based on integrated international literature review[J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(2): 48-54.
- [7] DESOUZA K C, FLANERY T H. Designing, planning, and managing resilient cities: a conceptual framework[J]. *Cities*, 2013, 35: 89-99.
- [8] 席广亮,甄峰,钱欣欣. 流动性视角下的国土空间安全及规划应对策略[J]. *自然资源学报*, 2022, 37 (8): 1935-1945.  
XI Guangliang, ZHEN Feng, QIAN Xintong. Territory spatial security and planning strategies from the perspective of mobility[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(8): 1935-1945.
- [9] HAO H, WANG Y. Disentangling relations between urban form and urban accessibility for resilience to extreme weather and climate events[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 220: 104352.
- [10] 颜文涛,黄欣. 如何通过城市土地利用规划管理雨洪灾害——回顾与展望[J]. *西部人居环境学刊*, 2018, 33 (6): 19-25.  
YAN Wentao, HUANG Xin. Land use planning for improving the disaster-carrying capacity against storm water—a review[J]. *Journal of Human Settlements in West China*, 2018, 33(6): 19-25.
- [11] MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 147: 38-49.
- [12] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. *国际城市规划*, 2017, 32 (5): 15-25.  
LI Tongyue. New progress in study on resilient cities[J]. *Urban Planning International*, 2017, 32(5): 15-25.
- [13] 李亚,翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. *规划师*, 2017, 33 (8): 5-11.  
LI Ya, ZHAI Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion[J]. *Planners*, 2017, 33(8): 5-11.
- [14] 吴志强,鲁斐栋,杨婷,等. 重大疫情冲击下城市空间治理考验[J]. *城市规划*, 2020, 44 (8): 9-12.  
WU Zhiqiang, LU Feidong, YANG Ting, et al. Challenges for urban space governance under the major epidemic impact[J]. *City Planning Review*, 2020, 44(8): 9-12.
- [15] 仇保兴. 基于复杂适应系统理论的韧性城市设计方法及原则[J]. *城市发展研究*, 2018, 25 (10): 1-3.  
QIU Baoxing. Methods and principles of designing resilient city based on complex adaptive system theory[J]. *Urban Development Studies*, 2018, 25(10): 1-3.
- [16] 朱宁,任云英,高琦. 城市形态研究综述[J]. *华中建筑*, 2016 (1): 42-45.  
ZHU Ning, REN Yunying, GAO Qi. Review of the urban morphology[J]. *Huazhong Architecture*, 2016(1):42-45.
- [17] 陈利顶,景永才,孙然好. 城市生态安全格局构建:目标、原则和基本框架[J]. *生态学报*, 2018, 38 (12): 4101-4108.  
CHEN Liding, JING Yongcai, SUN Ranhao. Urban eco-security pattern construction: targets, principles and basic framework[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [18] 修春亮,魏冶,王绮. 基于“规模—密度—形态”的大连市城市韧性评估[J]. *地理学报*, 2018, 73 (12): 2315-2328.  
XIU Chunliang, WEI Ye, WANG Qi. Evaluation of urban resilience of Dalian City based on the perspective of "size-density-morphology"[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(12): 2315-2328.
- [19] 颜文涛,卢江林,李子豪,等. 城市街道网络的韧性测度与空间解析——五大全球城市比较研究[J]. *国际城市规划*, 2021, 36 (5): 1-12, 137.  
YAN Wentao, LU Jianglin, LI Zihao, et al. Implications of measuring resilience of urban street networks: comparative study of five global cities[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(5): 1-12, 137.
- [20] LHOMME S, SERRE D, DIAB Y, et al. Analyzing resilience of urban networks: a preliminary step towards more flood resilient cities[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, 13(2): 221-230.
- [21] 颜文涛,任婕,张尚武,等. 上海韧性城市规划:关键议题、总体框架和规划策略[J]. *城市规划学刊*, 2022 (3): 19-28.  
YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. Resilient urban planning in Shanghai: key issues, general framework, and planning strategies[J]. *Urban Planning Forum*, 2022(3): 19-28.
- [22] 罗桑扎西,甄峰,张姗姗. 复杂网络视角下的城市人流空间概念模型与研究框架[J]. *地理研究*, 2021, 40 (4): 1195-1208.  
LUO Sangzhaxi, ZHEN Feng, ZHANG Shanqi. A conceptual model and methodological framework for examining urban people flow space based on complex network perspective[J]. *Geographical Research*, 2021, 40(4): 1195-1208.
- [23] HAMEDMOGHADAM H, JALILI M, VU H L, et al. Percolation of heterogeneous flows uncovers the bottlenecks of infrastructure networks[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1254.
- [24] SALAT S. A systemic approach of urban resilience: power laws and urban growth patterns[J]. *International Journal of Urban Sustainable Development*, 2017, 9(2): 107-135.
- [25] SHARIFI A. Resilient urban forms: a review of literature on streets and street networks[J]. *Building and Environment*, 2019, 147: 171-187.