

# 基于系统视角的城市医疗系统地震韧性 评估方法研究\*

费智涛<sup>1</sup>, 郭小东<sup>1,2,✉</sup>, 刘朝峰<sup>3</sup>, 马 嘉<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 建筑与城市规划学院, 北京 100124; 2. 北京工业大学 北京城市与工程安全减灾中心, 北京 100124;  
3. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401)

**摘要:** 梳理了系统论、复杂性科学以及复杂城市系统理论脉络, 对比分析了一般系统论、复杂系统理论下的韧性框架内容, 总结了基于网络的复杂性系统视角下的评估指标。在系统分解的基础上, 确定基于网络化系统和韧性特征的 5 项指标, 并使用 ArcGIS 平台、Python 语言实现指标数据量化计算, 以北京市六环路内 189 个街道(办事处)为研究区, 对其医疗系统进行韧性评估, 结果显示: 研究区内街道韧性呈现圈层式衰减的空间分布模式; 按区(县)对医疗系统的地震韧性汇总表明, 东、西城区医院密度分别为 1.41 和 1.25 个/km<sup>2</sup>, 远高于其他区(县), 应合理配置医疗资源空间, 促进城乡医疗公平。

**关键词:** 地震韧性; 韧性评估与指标; 医疗系统韧性

**中图分类号:** P315.94

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)03-0431-10

## 0 引言

19 世纪 70 年代, Holling (1973) 首次在其《生态系统韧性和稳定性》中提出韧性概念, 从此, 韧性作为一种隐喻和视角被重视并不断发展 (Pickett *et al.*, 2004)。目前, 除了生态学 (Rogge-ma, 2014)、地理学 (李艳等, 2019), 在城乡规划研究的多个领域也引入了这一理念 (张惠璇等, 2017; 郝凌佳等, 2015; 刘堃等, 2012)。城市韧性尤其是韧性本身概念的内涵与外延之宽泛 (Ajibade, 2017), 为解决未知不确定性扰动对城市的影响、制定前瞻性政策与策略 (Adriana *et al.*, 2018) 提供了多重路径与选择 (托马斯·J·坎帕内拉等, 2015)。城市的韧性概念最早由防灾领域引入, 以各类灾害影响下的韧性为主题 (杨敏行等, 2016; 黄晓军, 黄馨, 2015), 其中地震灾害韧性主要关注城市在地震影响下的系统能力变化, 以城市医疗系统为例, 其不仅要在正常时期承担医疗保健的功能, 在震后维持其功能的连续性也

同样重要, 为此有必要对规划中设定的具有应急能力的医院进行韧性的评估。

在国际学术界, Cutter (2016) 总结了 27 个韧性评估框架与方法, 强调关注韧性过程和结果的关系; Bruneau 等 (2003)、Cimellaro 等 (2010, 2016) 和 Kammouh 等 (2017) 从地震灾害影响出发先后提出了韧性评估的框架、指标与量化方式。近年来, 国内更多的研究体现在设施结构韧性 (卢嘉茗等, 2019)、基础设施系统韧性 (李倩等, 2019; 石振武等, 2019) 和震后社会经济韧性 (周侃等, 2019) 等方面, 关于医疗系统地震韧性的研究较少 (尚庆学等, 2019), 多为医院单体的韧性评估, 缺少城市尺度下医疗系统的地震韧性评估研究。

面对城市的复杂性, 本文通过梳理系统论、复杂性科学和复杂城市系统理论的发展历程, 提出基于复杂系统视角和韧性特征的城市医疗系统地震韧性评估框架, 凸显医疗服务在空间运行方面的重要性。另外, 使用街道(办事处)为基本单元呈现评估结果, 试图将地震韧性作为一种客观评估要素嵌入城市防灾规划。

\* 收稿日期: 2020-03-30.

基金项目: 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室重点专项 (2019EEEEVL0501) 资助.

✉ 通讯作者: 郭小东 (1977-), 教授, 博士. 主要从事城市安全与防灾减灾研究. E-mail: guoxd7797@163.com.

# 1 系统视角下城市韧性指标梳理

## 1.1 系统论、复杂性科学到复杂城市系统理论

系统论诞生于 20 世纪 40 年代,最早由美籍奥地利学者 Bertalanffy 提出,也被称为一般系统论。简言之,一般系统论是研究和推导一般适用于“系统”的各种原理的科学,经历经典系统论、现代系统论 2 个发展阶段(常绍舜, 2011)。20 世纪六七十年代,美籍匈牙利数学家 Von neumann、法国当代思想家 Edgar Moran 等阐释了复杂性的重要与“复杂性方法”(向成军, 2019)。20 世纪 80 年代,圣菲研究所的建立标志着“复杂性科学”的诞生(武杰等, 2016),为之后的各类复杂性研究(如混沌理论、复

杂适应性系统等)提供了基础(向成军, 2019)。

复杂城市系统理论依托系统论、复杂性理论发展,简·雅各布斯(2005)、克里斯托弗·亚历山大(1985)强调了城市的高度复杂性,后者提出的“准网络”(Semi-lattice)结构,体现了不同子系统之间的重叠关系。基于以上基础,Salinas (1998)融合分形、混沌等理论,更加关注系统节点(Node)和模块(Module)之间关系,促进了研究范式的转型(肖彦,孙晖, 2013)(图 1)。复杂的城市系统具备的动态演化特征,体现了自下而上的系统变化方式,更加考虑了系统网络要素与模块之间的关系,与一般系统论中自上而下的层级系统划分方式具有本质区别。当然,复杂性城市系统理论并不是要否定这种方式。



图 1 系统论、复杂性科学及复杂城市系统理论发展

Fig. 1 The development of the theory of the system theory, complexity science and complex urban system

## 1.2 基于一般系统认识的韧性框架指标

传统城市研究领域关于系统的认识源于一般系统论,城市系统被定义为相互作用元素或客体构成的有机整体(迈克尔·巴蒂, 2019),虽然系统可由层次化的要素构成,但并不是封闭的、秩序化层级体系。倪晓璐和黎兴强(2019)认为韧

性城市评价体系可基于城市基本构成要素、城市韧性的特征和韧性阶段过程 3 个出发点构建,如 BRIC 框架、PEOPLES 框架等。虽然明确的层级化分类为指标量化计算提供便捷,但也造成难以构建指标之间关联的问题,因此研究人员采用指标函数关系或相互关系矩阵等方式表征指标之间的

相关性（表 1）。面对城市系统具备的自组织、演化等复杂特征，韧性评估需要在系统层面更多地考虑这种相关性，更加体现韧性的特征。

表 1 基于系统层级化分类的韧性评估框架对比

Tab. 1 Comparison of resilience assessment framework based on systematic hierarchical classification

韧性框架	层级化系统组成	考虑要素相关性
BRIC	社会、经济、社会资本、机构、住房与基础设施、环境	比值（相关矩阵）
PEOPLES	人口、环境、有组织的政府服务、基础设施建设、生活方式、经济和社会资本	相关矩阵
Resilience US	社区/街坊、企业、家庭、生命线系统	函数式
Oregon Resilience Plan	商业和劳动力连续性、沿海社区、关键建筑、交通、能源、信息和通信、水和废水	定性描述
Community Resilience Planning Guide for Buildings and Infrastructure Systems	社会维度、建筑、交通、能源、通信、水和废水	定性描述

1.3 基于复杂系统构成的韧性框架指标

学术界对城市系统的认识经历了均衡稳态到复杂演化的演变，复杂适应性系统理论是城市韧性过程的最新认识（仇保兴，2018），基于此构建的韧性框架体现了城市的动态性、演化性和自组织等特征，越来越多的学者将城市韧性置于复杂适应性系统之上开展研究（Cumming, 2011；Davies, 2015；Sharifi, Yamagata, 2016）。

复杂网络理论为城市复杂系统研究提供了新的思路与方法，韧性评估框架可利用各种城市复杂网络模型加以描述和计算（Cumming, 2011）。复杂网络理论将城市中的要素视为节点（模块），通过网络连接和要素流体现城市的自组织。Salin-garos（1998）认为节点、模块之间的连接关系正是导致系统呈现自发与涌现性特征的关键，可以使用网络算法计算并体现在韧性指标上。彭翀等（2019）、Aydin 等（2018）基于 Python 与 ArcGIS 平台构建城市系统网络模型计算韧性指标，前者使用网络效率、平均独立路径数量等指标反映城

市群网络的快速性与多样性等韧性特征；后者则使用中间中心性、网络效率，对加德满都在地震影响下重要设施节点的健壮性做出评估。网络化的系统评估框架并没有摒弃层级化的系统分类，而是它的延续与发展，表 2 从指标特点、内容、形式和计算 4 个方面对比了 2 种系统的韧性指标。不少学者也认为复杂系统下的韧性框架在研究系统的演化路径与结构方面具有优势（Aydin *et al*, 2018；田达睿, 2019），但简化的韧性框架更具操作性（Serre *et al*, 2018；Fresco, Timm, 2016）。

表 2 基于一般系统和复杂系统的韧性指标对比

Tab. 2 Resilience index comparison based on general systems and complex systems

指标属性	一般系统	复杂系统
特点	层级化	层级化、网络化
内容	结构性指标	结构性指标、空间性指标
形式	多为结构性指标，少量空间性指标转化为结构性指标，如医院床位数量、服务半径等	结构性指标：节点（模块）具备的属性，如医院床位数等；空间性指标：位置和联系，如密度、中心性、可达性等
计算	直接统计计算	统计计算、复杂网络计算

2 基于系统视角的城市地震韧性指标框架构建

2.1 地震韧性概念的界定与系统分解

韧性的概念较为宽泛，这导致韧性评估很难找到唯一的方法在各层次、各尺度的场景中使用。为构建合乎本研究需求的韧性框架，首先需要对韧性的研究对象，即所研究的城市系统做出限定。本文将地震韧性视为一种阶段性过程，包括震前的准备、震时的响应与震后的恢复 3 个阶段。其中，所有为地震所做的准备（包括震害防御、吸收和各种为震后恢复所做的日常准备）都集中在震前。韧性能力是一种过程性能力，在震前表现为系统是否足够健壮，因此，要更加关注承灾体本身而非灾害，评估震前所具备的防灾减灾能力是本文研究的重点。在此基础上，选取为城市应急抢险救援、避险避难等提供应急服务的设施作为研究对象，包括应急指挥、应急医疗、消防抢

险物资储备和避难安置等,其中应急医疗承担着震后急救、手术等重要功能,对于保障人的生命健康安全十分重要。此外,应急医院一般按其等级、服务能力来划分服务半径,具有空间研究的价值。

本文以应急服务设施中的医疗设施子系统为地震韧性评估框架构建的目标系统,其中医院选取具备较高应急救援能力的综合性医院,从网络的视角,着重分析城市应急医疗设施的空间联系。地震灾害将作为一种场景要素被纳入研究,医院、城市道路等设施在地震场景下功能的下降体现在医院建筑、功能受损和城市道路破坏、障碍物阻碍道路等方面,会影响灾后医疗服务的水平与空间服务能力,导致灾后医疗系统地震韧性的下降。本文以北京市六环路内的区域为研究范围,基于可行性、数据可得性、真实性原则构建地震韧性评估框架与指标,并将计算结果反映在城市的基层行政管理单元——街道(办事处)。

## 2.2 研究数据

本文研究数据来源于统计数据和网络开源数据。其中医疗设施点数据使用 Python 网络爬虫爬取,包含名称、性质、等级和地址信息等属性共 2 953 条,经过筛选、处理,最终保留等级为三级的医院。为了计算应急医疗系统的空间联系,爬取研究范围内城市道路路段 25.4 万条,包含长度、等级、速度和位置等属性,并去除空值、辅路、立交桥、胡同斜街等类别,转化为道路单线。根据《北京市交通运行分析报告(2015 年)》<sup>①</sup>,本文采用早、晚高峰与非高峰时间的平均速度作为道路速度,见表 3,计算设施点与需求点的通行情况。对于应急医疗服务的需求点,

虽然类型多样,但基于方便计算考虑,使用居住区作为应急医疗服务的需求点,通过高德地图 API 爬取研究范围内居住区 3 220 个,属性包括名称、位置、规模等。

## 2.3 指标构建与选取

本文研究的目的是基于复杂系统视角构建地震场景下的应急医疗系统韧性框架。评估指标考虑节点(模块)和节点之间的联系程度,以反映城市应急医疗系统韧性的特征。基于城市韧性的健壮性、冗余性、多样性和快速性特征构建地震韧性评估框架,指标计算结果将反应在街道单元中,体现街道的地震韧性能力。

### 2.3.1 健壮性

城市医疗系统网络的健壮性不仅体现在医院本身的抗震能力、医疗水平等方面,其在城市中的空间活动同样重要。本文使用度数中心性来体现空间性运作,医院的度数中心性越高,表明该医院在整体网络中处于较为重要的地位,对于附近的需求点(居住区)而言十分重要。

$$C_{RD}(n_i) = d(n_i) / (N - 1) \quad (1)$$

式中:  $C_{RD}(n_i)$  为度数中心度;  $d(n_i)$  为与某一节点直接相连的节点数;  $N$  为网络规模。

### 2.3.2 冗余性

冗余性被认为是系统运行中某些功能的重叠,对应急医疗而言,医院配套设施的冗余性配置有效增加了医院的抗震冗余性,使医院在面临灾害时功能不至于中断。医疗系统的空间冗余则体现在设施的服务范围在空间上的重叠:

$$Red_{i,j} = N_{b(r)} \quad (2)$$

式中:  $Red_{i,j}$  为医疗服务设施系统  $i$  在研究  $j$  单元的空间冗余度;  $N_{b(r)}$  为医疗系统  $i$  服务区在  $j$  单元内的数量。

### 2.3.3 多样性

多样性概念来源于生态学,生态系统中的物种多样性越强,系统就具备越强的抗干扰能力。仇保兴(2018)认为,多样化的城市系统布局应

表 3 北京市城市道路速度

Tab. 3 The speeds of the city road of Beijing

时段	城市道路速度/(km · h <sup>-1</sup> )			
	快速路	主干道	次干道	支路
早高峰	37.7	23.3	22.0	22.0
晚高峰	25.1	33.2	20.9	—
非高峰	80	60	50	30
平均速度	55.7	44.125	35.725	25.725

① 北京交通发展研究中心. 2016. 北京市交通运行分析报告(2015)。

是“分布式”的，对于城市的应急服务设施来说，去中心化的空间配置除了具有更强的灾害适应性，对整个城市系统的快速反应也起到了促进作用。虽然医院本身准备措施的多样、抗震措施的多样有助于医院在震时表现得更加稳健，但整个医疗服务系统给使用者提供的多样性选择更加重要。因此，本文使用选择多样性、转运多样性2个指标描述医疗系统地震韧性的多样性。

### (1) 选择多样性

选择多样性可反映子系统服务对于使用者在可接受范围内的多样考虑。使用需求者（居住区）的可选目的点数量来表征医疗系统的选择多样性：

$$C_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n c_{ij}}{n} \quad (3)$$

式中： $C_{ij}$ 为应急医疗服务设施系统*i*在研究单元*j*的选择多样性； $n$ 为*j*单元中包含的需求者（居住区）数量； $c_{ij}$ 为第*n*个需求者（居住区）可选目标设施数量。

### (2) 转运多样性

在震后应急救援活动中，除了存在需求者直接到达符合要求的救援目的地的情况外，还存在因第一目的地本身服务能力、损毁情况等限制，进行二次转移的可能性，本文采用转移多样性进行描述：

$$T_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{ij}}{n} \quad (4)$$

式中： $T_{ij}$ 为某服务设施系统*i*在研究单元*j*的转运多样性； $n$ 为*j*单元中包含的需求者（居住区）数量； $t_{ij}$ 为第*n*个需求者（居住区）通过可选目标设施，在可接受转移成本范围内可达的设施点数量。

### 2.3.4 快速性

快速性可以表征现有设施系统在受到不确定性扰动影响后，采取策略与救援恢复活动回到灾前甚至高于灾前水平的能力。本文主要关注医疗设施进行医疗活动的速度，即伤员转运、医疗救护等。地震可能导致道路、桥梁破坏，道路两侧的坠落物也可能导致震后道路通行能力降低。因此，震后城市道路空间运行中会存在不同类型与

级别的阻抗，导致了不同道路上可达性的差异，而可达性反应了快速性的韧性特征，可用时间来量化表征。可达性的计算模型有很多，本文采用空间阻隔模型来计算时间可达性：

$$H_{ij} = 1/(n-1) \sum_{j=1(i \neq 1)}^n (d_{ij}) \quad (5)$$

式中： $H_{ij}$ 为某个设施点的平均时间可达性； $n$ 为设施点*OD*个数； $i$ 为起始点编号； $j$ 为终点编号； $d_{ij}$ 为第*i*个设施点到第*j*个终点的最短路径时间。对于指标计算结果采用离差标准化方法统一数据量纲，使用熵权法对每个研究对象街道单元的指标进行计算并确定指标权重。

## 3 北京市六环路以内城区医疗系统地震韧性评估

### 3.1 研究区简介

北京作为我国首都，对其开展地震韧性研究尤为迫切。鉴于北京市建成区绝大部分位于六环路范围内，本文选取北京市六环路以内及其穿越的区县、街道为研究范围，除包括城六区（东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区、石景山区）外，还涵盖门头沟区、昌平区、通州区、房山区、顺义区和大兴区等局部地区，总计189个街道，如图2所示。

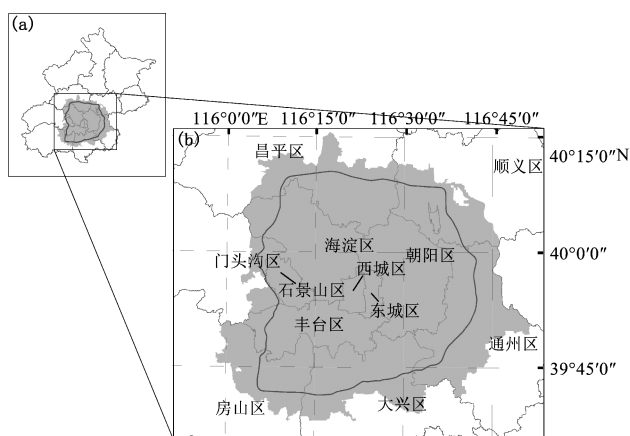


图2 研究区在北京市的位置 (a) 及所涉及的区 (县) (b)

Fig.2 The location of the study area in Beijing (a) and the districts involved in the study area (b)

### 3.2 医疗系统地震韧性指标计算

#### 3.2.1 健壮性

计算设施子系统的空间健壮性,首先需要构建评估网络。不同医院之间存在急诊分诊、患者转运等活动,可通过这些关系构建医院之间的联系。除空间联系外,医院单体本身的健壮性同样重要,体现在建筑抗震性能、医护人员数量和床位数等方面,但由于数据限制,本文采用平均距离构建医院之间的联系:

$$L_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^n l_{imin}}{n} \quad (6)$$

式中:  $L_{ave}$  为医院之间的平均欧氏距离;  $l_{imin}$  为研究范围内第  $i$  个医院到达距其最近医院的最短距离;  $n$  为医院数量。

根据式 (6) 计算得出研究区医院之间平均距离为 592.45 m (图 3)。选取每个医院平均半径内存在的其它医院与该医院构建联系并形成网络模型,由于研究区内医院的空间分布并不均匀,

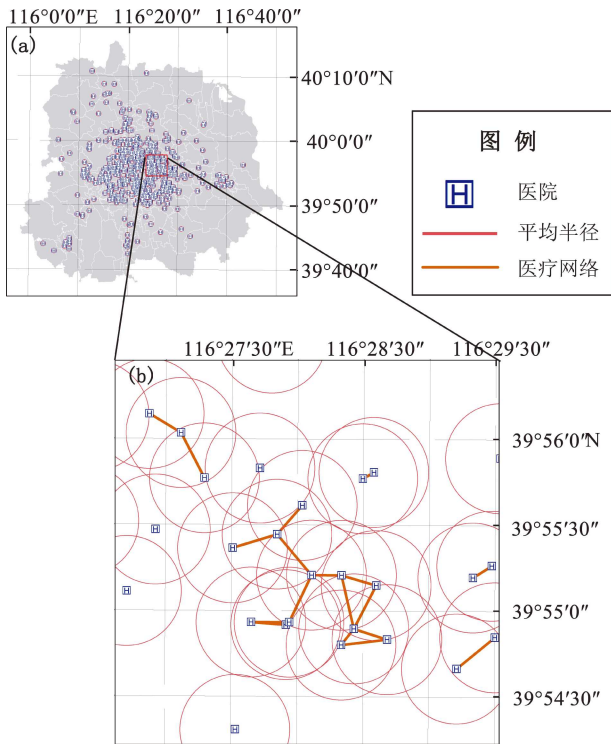


图3 研究区医疗网络构建 (a) 以及局部放大图 (b)

Fig.3 Medical network construction in study area (a) and partial enlarged view (b)

因此会形成局部联系网络。使用式 (1) 计算中心性,并反映为 189 个街 (区) 的健壮性等级 (图 4a)。研究区街 (区) 健壮性呈现中心高、四周低的“辐射状”空间分布模式,健壮性等级为 5 的街 (区) 在四环内占 66.2%,五环内占 44.3%。

#### 3.2.2 冗余性

医疗系统的冗余度考虑设施点为周边需求者提供的冗余选择。每一个医院的服务半径都考虑了医院在空间路径上的运作,据已有研究统计,国际上医疗救援时间为 8~10 min,而 2005 年北京市总体 120 急救反应时间中位数为 16.5 min,呼叫反应时间在 5 min 内的仅占 2.28%,而 30 min 以上的占 19.20% (陈辉等, 2007)。综合考虑,采用 10 min 的时间半径为本文 120 紧急救援呼叫反应时间划定服务半径。根据式 (2) 计算得到街 (区) 的医疗冗余性等级如图 4b 所示。

#### 3.2.3 多样性

计算选择多样性首先要划定需求点 (居住区) 10 min 的可接受医疗范围,其次,需统计落入每一个需求点可接受空间范围的应急医院数量,最后统计每个街 (区) 内应急服务设施个数的平均值,即为街 (区) 选择多样性指标。使用式 (3) 计算选择多样性,如图 4c 所示。由于设施本身救援能力的饱和,需求者无法在首次选择的设施点得到紧急服务,则需将其需求转移至其它相关设施,这就需要计算每个需求者通过一个设施与其它设施的联系程度,使用式 (4) 进行计算,结果如图 4d 所示。

#### 3.2.4 快速性

本文使用时间可达性来反映快速性指标。基于 GIS 道路网络构建可达性计算的 OD 成本矩阵,使用式 (5) 求取街 (区) 时间可达性,并反映在研究区 189 个街 (区) 内 (图 4e)。

### 3.3 医疗地震系统韧性评估

综合上述 5 个指标,使用熵权法计算各个指标的权重依次为 0.051 4, 0.234 3, 0.209 4, 0.376 3 和 0.128 3,进而求取每个街 (区) 的医疗系统地震韧性能力:

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_i x_{ij} \quad (7)$$



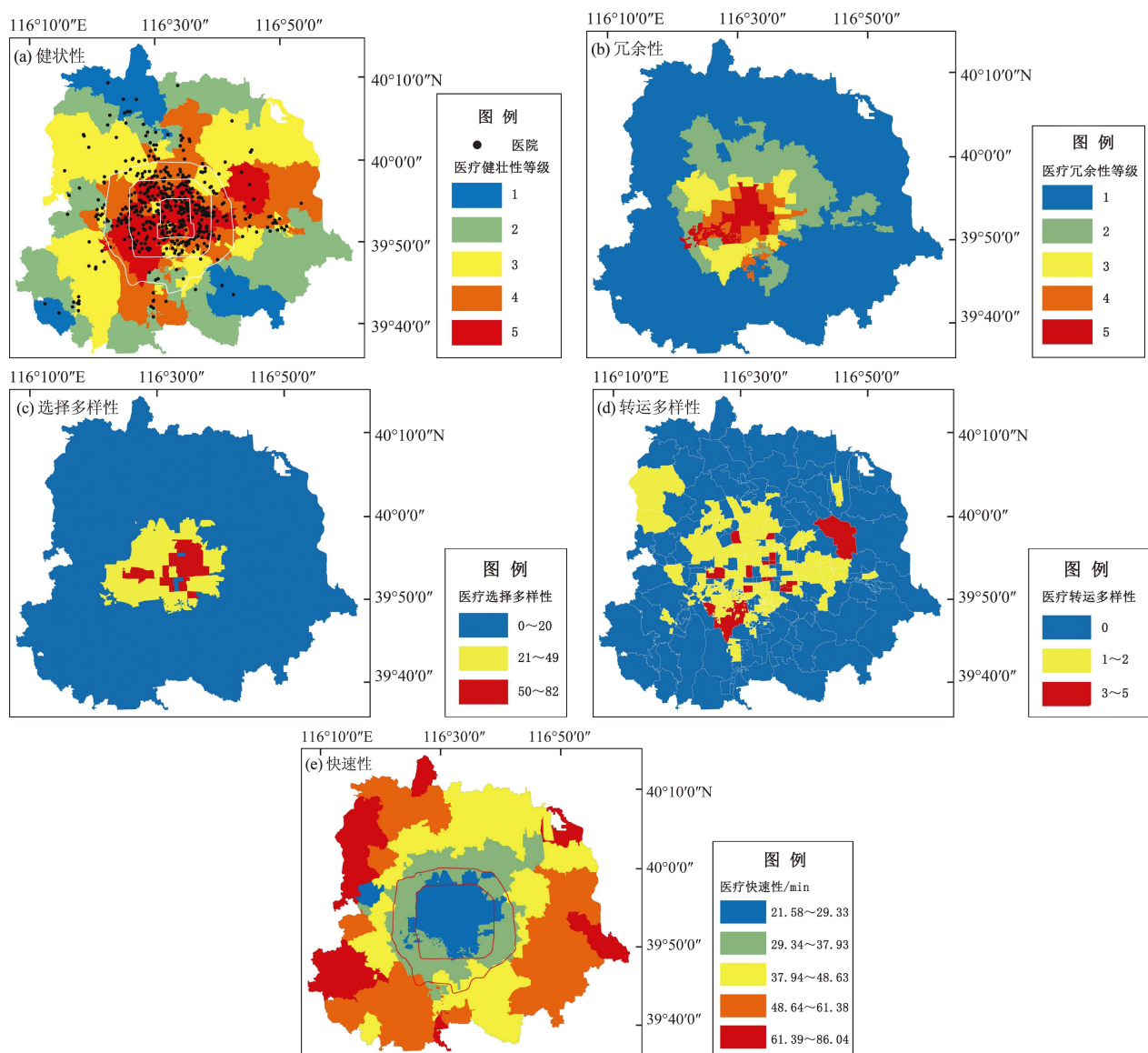


图 4 医疗系统地震韧性指标计算结果

Fig. 4 Map of the calculation results of medical system resilience evaluation indexes

式中： $R_j$  为第  $j$  个街（区）的医疗系统地震韧性； $x_{ij}$  为第  $j$  个街道第  $i$  项指标标准化得分； $w_i$  为第  $i$  个指标的权重。研究区全部街道的医疗系统地震韧性情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出，北京市六环内的医疗系统地震韧性呈现“向心性”，与其一直以来的圈层式发展模式相关。使用环路作为参照，发现在四环内韧性水平高于 0.22，即处于中等偏上韧性的面积占 90.1%，五环内处于中等及以上韧性面积占 45.2%，“城八区”紧急医疗设施地震韧性处于较高、高水平，特别是景山街道（0.74）、金融街街道（0.72）、北新桥街道（0.70）和东四街道（0.68）

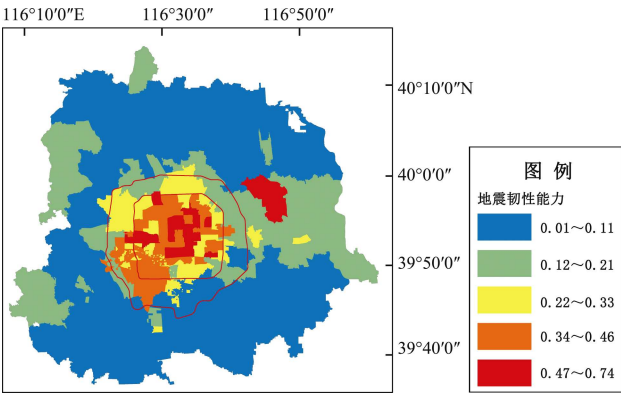


图 5 医疗系统地震韧性评估结果

Fig. 5 Assessment results of earthquake resilience of medical system

等街(区)。位于五环路外的街(区)普遍呈现低水平韧性,在空间上表现为南北对称分布。其中,金盏地区办事处位于五、六环之间,表现为高韧性水平(0.49),该街区虽然周边可选的医院较少,但进行二次转运的多样性、快速性指标较好,空间联系有效地弥补了金盏地区相对较弱的医院冗余,提升了其韧性。

将189个街(区)医疗系统的韧性能力值按照区(县)汇总,其中韧性水平最高的为东城区(0.485),其次是西城区(0.464),与东、西城区较高的医疗资源数量成正相关。使用医院数量与区(县)面积的比值反映区(县)医院密度,东、西城区分别为1.41个/ $\text{km}^2$ 和1.25个/ $\text{km}^2$ ,远高于位于第3位的朝阳区0.38个/ $\text{km}^2$ (图6)。

东、西城区医院的高密度从本质上提升了其应急医疗韧性能力。由于北京市中心医疗资源的过度集中,外围区(县)如房山、门头沟、顺义和昌平等应急医疗的地震韧性略显不足,震后除医院本身发生不同程度的功能下降外,城市交通能力下降将使医院和需求点、医院和医院之间的联系变得更加脆弱。医院的空间配置影响着医疗公平,对医疗设施作出合理的空间安排与规划,对于提升城乡医疗公平、减少需求者因时空成本判别误差,减少“损失规避”的非理性就医行为有所裨益(蒋翠珍等,2019)。

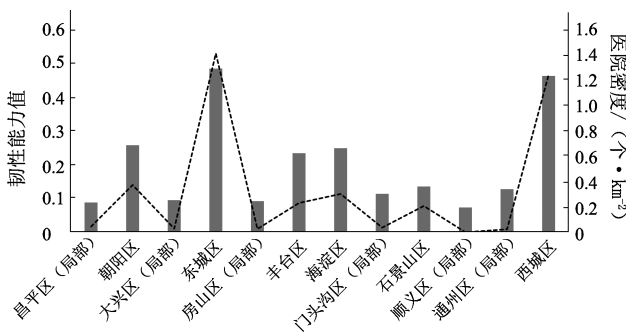


图6 区(县)医疗系统的韧性能力与医院密度

Fig. 6 District resilience of medical system and hospital density

## 4 结论

本文基于系统视角,分析了典型韧性评估框

架及其指标特点。研究发现,现有的城市韧性评估框架大多基于一般系统论,构建层级化的评估框架和指标,难以反映系统要素间存在的联系。本文基于复杂城市系统和复杂网络理论构建医疗系统地震韧性评估框架,指标体现了节点和模块的网络特征,如中心性、多样性和演化等特征。以北京市六环范围内189个街(区)为研究对象,从复杂性认识出发构建了体现韧性特征的指标,通过网络和空间运算得到城市应急医疗系统的地震韧性。结果显示研究区范围内街道医疗系统地震韧性呈现中心高、四周低的特点;区(县)尺度上,东城区、西城区医院密度处于高水平,外围区(县)相对较低,医疗配置并不是十分平均。

研究发现,两种系统认知一脉相承,但复杂城市系统视角下的韧性评估更加关注节点与模块之间的关联性,如医院与医院、医院与需求点之间的空间联系,体现了城市系统的动态和演化过程,这些与韧性的特征相匹配。同时,由于研究区二环内医疗资源过于集中,导致不同城区医疗系统的韧性水平差异明显,规划应注重医疗设施的空间布局合理性,选则合适的密度配置医院,这也是实现医疗公平的具体措施。

当前,对系统要素的分解还需依托更为全面的系统认识。同时,空间性指标、结构性指标的有机结合也应在未来城市韧性评估中加以体现,才能更好地服务于应急资源的优化配置。复杂城市系统具备的自发性、涌现性与城市中的人类活动及其相互作用密不可分,如何将城市人的活动融入到复杂城市系统的韧性评估框架中去,作为节点、模块,亦或是作为一种流态,又需要用何种指标进行衡量,是未来复杂城市系统韧性研究的方向之一。

## 参考文献:

- 仇保兴. 2018. 基于复杂适应理论的韧性城市设计原则[J]. 现代城市研究, 13(3): 1-6.
- 石振武, 谭宪宇, 刘洁. 2019. 防震视角下综合管廊韧性评价体系[J]. 土木工程与管理学报, 36(3): 19-26.
- 卢嘉茗, 解琳琳, 李爱群, 等. 2019. 适用于区域RC框架结构隔震韧性提升的简化模型[J]. 工程力学, 36(8): 226-234, 247.
- 田达睿. 2019. 复杂性科学在城镇空间研究中的应用综述与展望[J]. 城市发展研究, 26(4): 25-30.



- 迈克尔·巴蒂. 2019. 新城市科学[M]. 刘朝晖, 吕荟译. 北京: 中信出版集团.
- 托马斯·J·坎帕内拉, 罗震东, 周洋岑. 2015. 城市韧性与新奥尔良的复兴[J]. 国际城市规划, 30(2): 30–35.
- 向成军. 2019. 对复杂性理论的思考[J]. 系统科学学报, 27(4): 7–11.
- 刘堃, 全德, 金珊. 2012. 韧性规划·区间控制·动态组织——深圳市弹性规划经验总结与方法提炼[J]. 规划师, 28(5): 36–41.
- 克里斯托弗·亚历山大. 1985. 城市并非树形[J]. 严小婴译. 建筑师, (6): 206–224.
- 杨敏行, 黄波, 崔峰, 等. 2016. 基于韧性城市理论的灾害防治研究回顾与展望[J]. 城市规划学刊, (1): 48–55.
- 李艳, 陈雯, 孙阳. 2019. 关联演化视角下地理学区域韧性分析的新思考[J]. 地理研究, 38(7): 1694–1704.
- 李倩, 郭恩栋, 李玉芹, 等. 2019. 供水系统地震韧性评价关键问题分析[J]. 灾害学, 34(2): 83–88.
- 肖彦, 孙晖. 2013. 如果城市并非树形——亚历山大与萨林加罗斯的城市设计复杂性理论研究[J]. 建筑师, (6): 78–85.
- 张惠璇, 刘青, 李贵才. 2017. “刚性·弹性·韧性”——深圳市创新型产业的空间规划演进与思考[J]. 国际城市规划, 32(3): 130–136.
- 陈辉, 李航, 张进军, 等. 2007. 北京市120急救网络呼叫反应时间的研究[J]. 中华急诊医学杂志, 16(10): 1111–1114.
- 武杰, 刘焯, 孙雅琪. 2016. 复杂性科学的主要方法及其基本特征[J]. 系统科学学报, 24(4): 28–33.
- 尚庆学, 李吉超, 王涛. 2019. 医疗系统抗震韧性评估指标体系[J]. 工程力学, 36(S1): 106–110.
- 周侃, 刘宝印, 樊杰. 2019. 汶川 $M_s 8.0$ 地震极重灾区的经济韧性测度及恢复效率[J]. 地理学报, 74(10): 2078–2091.
- 郝凌佳, 钟悠, 王承慧. 2015. 弹性规划理念下的文化创意产业集聚区规划探讨——以中国宋庄文化创意产业集聚区为例[J]. 规划师, 31(7): 73–79.
- 倪晓露, 黎兴强. 2019. 韧性城市评价体系的三种类型及其新的发展方向[J/OL]. (2019)[2020-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5583.TU.20190909.0952.002.html>.
- 黄晓军, 黄馨. 2015. 弹性城市及其规划框架初探[J]. 城市规划, 39(2): 52–58.
- 常绍舜. 2011. 从经典系统论到现代系统论[J]. 系统科学学报, 19(3): 1–4.
- 彭翀, 陈思宇, 王宝强. 2019. 中断模拟下城市群网络结构韧性研究——以长江中游城市群客运网络为例[J]. 经济地理, 39(8): 68–76.
- 蒋翠珍, 罗传勇, 曾国华. 2019. 最佳就医距离与医疗公平及非理性医疗行为[J]. 江西社会科学, 39(5): 73–84.
- 简·雅各布斯. 2005. 美国大城市的死与生[M]. 金衡山译. 南京: 译林出版社.
- Adriana X, Jeroen H, Paul P. 2018. The City Politics of an Urban Age: Urban Resilience Conceptualisations and Policies[J]. Palgrave Communications, 4(1): 25.
- Ajibade I. 2017. Can a Future City Enhance Urban Resilience and Sustainability a Political Ecology Analysis of Eko Atlantic City, Nigeria[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 26: 85–92.
- Aydin N Y, Duzgun H S, Wenzel F, et al. 2018. Integration of Stress Testing with Graph Theory to Assess the Resilience of Urban Road Networks Under Seismic Hazards[J]. Natural Hazards, 91(1): 37–68.
- Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T. 2003. A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities[J]. Earthquake Spectra, 19(4): 733–752.
- Cimellaro G P, Reinhorn A M, Bruneau M. 2010. Framework for Analytical Quantification of Disaster Resilience[J]. Engineering Structures, 32(11): 3639–3649.
- Cimellaro G P. 2016. Damage Losses Assessment Models[M]. Cham: Springer International Publishing, 71–92.
- Cumming G S. 2011. A Theoretical Framework for the Analysis of Spatial Resilience[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 35–66.
- Cutter S L. 2016. The Landscape of Disaster Resilience Indicators in the USA[J]. Natural Hazards, 80(2): 741–758.
- Davies W K D. 2015. Resilient Cities: Coping With Natural Hazards[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 311–357.
- Fresco N, Timm K. 2016. Fostering Resilience in the Face of an Uncertain Future: Using Scenario Planning to Communicate Climate Change Risks and Collaboratively Develop Adaptation Strategies[M]. Cham: Springer International Publishing, 79–94.
- Holling C S. 1973. Resilience and Stability of Ecological Systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, (4): 1–23.
- Kammouh O, Noori A Z, Renschler C S, et al. 2017. Resilience Quantification of Communities Based on PEOPLES Framework[C]. 16th World Conference on Earthquake, 16WCEE 2017.
- Pickett S T A, Cadenasso M L, Jrove J M. 2004. Resilient Cities: Meaning, Models, and Metaphor for Integrating the Ecological, Socio-Economic, and Planning Realms[J]. Landscape and Urban Planning, 69(4): 369–384.
- Roggema R. 2014. Swarming Landscapes, New Pathways for Resilient Cities[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 163–179.
- Salingaros N A. 1998. Theory of the Urban Web[J]. Journal of Urban Design, 3(1): 53–71.
- Serre D, Barroca B, Balsells M, et al. 2018. Contributing to Urban Resilience to Floods with Neighbourhood Design: the Case of Am Sandtor-kai/Dalmannekai in Hamburg[J]. Journal of Flood Risk Management, 11(S1): S69–S83.
- Sharifi A, Yamagata Y. 2016. Urban Resilience Assessment: Multiple Dimensions, Criteria, and Indicators[M]. Cham: Springer International Publishing, 259–276.

## Research on Earthquake Resilience Assessment Method of Urban Medical System Based on System Perspective

FEI Zhitao<sup>1</sup>, GUO Xiaodong<sup>1,2</sup>, LIU Chaofeng<sup>3</sup>, MA Jia<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

(2. Beijing Institute of Earthquake Disaster Reduction, Beijing 100124, China)

(3. College of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

### Abstract

Firstly, the evaluation indexes from the perspective of complex system and network are summarized, the system theory, the complexity science and the complex urban system theory are sorting out, and the resilience frameworks under general system theory and complex system theory are compared and analyzed. Secondly, based on system decomposition, 5 indices are used to do some data quantitative calculation with network system and characteristics of resilience, which depends on ArcGIS platform and Python language. Taking 189 blocks in the six circle express way in Beijing as the study area, we evaluate the medical system resilience. The results show that the spatial distribution of the blocks' resilience shows a pattern of circular attenuation. According to the summary of districts resilience of medical system, the density of hospitals in eastern and western districts is 1.41 and 1.25 /km respectively, which is much higher than other districts. Therefore, the spatial allocation of medical resources should be reasonably carried out to promote the fairness of urban and rural medical treatment.

**Keywords:** earthquake resilience; resilience index; medical system resilience