

程朋根, 付家能, 李聪毅, 等. 城市韧性量化评估研究进展[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 139–147. [CHENG Pengen, FU Jianeng, Li Congyi, et al. A Review of Urban Resilience Quantitative Assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 139–147. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.022.]

# 城市韧性量化评估研究进展<sup>\*</sup>

程朋根<sup>1,2</sup>, 付家能<sup>1</sup>, 李聪毅<sup>1</sup>, 陈晓勇<sup>1,2</sup>

(1. 东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 江西 南昌 330013;  
2. 自然资源部环鄱阳湖区域矿山环境监测与治理重点实验室, 江西 南昌 330013)

**摘 要:** 在全球环境变化、快速城市化以及新冠等大流行病频发的背景下, “韧性”一词提出为城市抵抗不确定风险提供新的发展方向, 城市韧性研究已成为城市规划与管理领域的重要研究课题。该文在分析现有研究文献基础上, 从影响城市韧性的起源、城市韧性框架、城市韧性的多重因素等方面出发, 对城市韧性量化评估研究现状进行综述。具体包括: ①梳理总结城市韧性量化常用的评估方法, 选取 12 种具有代表性的方法进行对比分析。②从社会、经济、生态、基础设施、组织制度等 5 个维度梳理 32 个城市韧性指标因子, 构建城市韧性量化评价指标体系, 分析指标对城市韧性的影响。③对未来城市韧性量化评估研究热点和趋势进行展望, 即从城市韧性的压力源、演变机制、多尺度分析、时空量化分析以及数字孪生城市结合等方面推动未来韧性城市研究。

**关键词:** 城市韧性; 量化评估; 评估框架; 评价指标

**中图分类号:** X915.5; X43; F124; TU98 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2023)03–0139–09

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2023.03.022

2021 年, 中国发布《有目标的未来城市》<sup>[1]</sup> 报告, 预计 2030 年全球有 60% 的人口生活在城市, 80% 的 GDP 由城市创造, 75% 的碳排放和能源消耗集中在城市, 可见城市发展对于社会稳定、经济繁荣和人民幸福至关重要。与此同时, 地震、洪水等自然灾害; 恐怖袭击、疾病传播等人为灾难; 能源短缺、气候变化等累积型冲击暴露了城市的脆弱性<sup>[2]</sup>, 严重威胁到城市安全与人民的生命健康。为了提升城市应对重大风险的能力, 建设具有包容、安全、韧性、可持续的城市诞生<sup>[3]</sup>。2013 年, 洛克菲勒基金会启动“全球 100 韧性城市”项目, 旨在帮助世界各城市提高韧性, 应对自然、社会、经济等挑战<sup>[4]</sup>。建设韧性城市成为城市亟须研究的新课题。

近年来, 随着理论方法逐渐完善、应用领域不断扩展, 城市韧性已成为评估城市的重要工具。从已有文献来看, 城市韧性研究仍处于概念、内涵、框架<sup>[5–7]</sup>、评价指标等理论研究阶段, 但其中有 67.7% 属于定量研究, 45.2% 属于定性研究以及 39.8% 混合研究, 学术界对城市韧性研究逐步从定性分析向定量分析转变<sup>[8]</sup>。本文对城市韧性量化评估相关研究进展进行总结, 梳理韧性评价常用的方法及优缺点; 从社会、经济、生态、基础设施、组织制度等维度概括常用指标因子, 分析其对城市韧性的影响; 分析城市韧性量化评估研究热点和趋势, 以期对不同城市

韧性研究提供参考。

## 1 城市韧性研究历程

“韧性”刻画了事物受到扰动后的反应。1973 年, 霍林首次将韧性引入到生态学中并定义其概念为“生态系统受到扰动后恢复到原来状态的能力”<sup>[9]</sup>。随后对韧性研究逐渐从自然生态学转到社会生态学, 韧性观点从工程韧性到生态韧性再到演进韧性发生了两次彻底的转变<sup>[10–12]</sup>, 表现为单一平衡态到多重平衡态再到适应性循环的系统运行机制的巨大飞跃。随着社会不断发展, 信息连接并运转着整个城市的社会子系统, 融入“信息”的动态复合韧性被提出<sup>[13]</sup>。韧性内涵不断丰富和完善, 应用领域不断扩展和延伸, 但韧性的核心仍是抵御、吸收、适应不确定风险的能力<sup>[14]</sup>。HOLLING<sup>[15]</sup>提出了具有韧性能力和“适应性循环”理论, 为韧性城市发展奠定了基础。根据上述韧性概念梳理, 表 1 总结各阶段韧性的内涵及特征。

韧性城市早在 20 世纪 90 年代就被提出<sup>[16]</sup>, 直到 2002 年地区可持续发展国际理事会才首次将“韧性城市”引入到城市防灾的研究中<sup>[17]</sup>, 自此韧性城市研究拉开序幕。2005 年, 第二届世界减灾会议将“韧性”纳入到灾害讨论的重点<sup>[18]</sup>, 但此时韧性城市的关注点主要是设施环境层面。2013 年,

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022–12–13

修回日期: 2023–04–23

基金项目: 国家自然科学基金(41861052); 江西省自然科学基金项目-面上项目(20202BAB1202045)

第一作者简介: 程朋根(1964–), 男, 汉族, 江西南昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地理信息系统理论与应用、城市生态环境评价研究. E-mail: pgcheng1964@163.com

洛克菲勒基金会正式启动“全球 100 韧性城市”，中国的义乌、德阳、海盐和黄石四座城市成功入选<sup>[19]</sup>。2016 年，第三届联合国住房与可持续大会将“城市的生态与韧性”作为新城市议程的核心内容之一，为人与环境的相互作用提供了新的研究热点<sup>[20]</sup>。2020 年，中国“十四五”规划将“韧性城市”作为建设城市的远景目标，旨在打造新型化中国城市。图 1 展示了城市韧性研究的时间节点。

## 2 城市韧性量化评估研究现状

### 2.1 城市韧性量化评估理论框架

由于不同学科对城市韧性概念，抵御风险的理解存在差异，故城市韧性理论框架也存在较大差异。表 2 对现有理论框架从复杂适应系统、风险灾害、城市社区、城市治理四类视角进行总结：①复杂适应系统视角强调城市系统在面对扰动时的动态变化过程，在扰动各阶段分析对城市的影响，并提出相应的策略。霍林等<sup>[15]</sup>提出的“适应性循环”模型，从系统论的角度揭示韧性系统是处于动态变化的。联合国环境署等组织从韧性研究的 3 个关键概念建立韧性、适应性和转变评价框架 (Resilience Adaptation Transformation Assessment Framework, RATA)，以应对未来的不确定性和各种变化<sup>[21]</sup>。NYSTRÖM 等<sup>[22]</sup>提出人类 - 环境耦合系统可持续框架 (Human - Environment Systems, HES)，阐释了系统的内因机制、多重反馈等特征，为人与环境的城市韧性提供参考。②风险灾害视角主要是从城市系统的持续性出发，以灾害风险治理为首要目标。社区灾害韧性框架 (Community

Disaster Resilience Framework, CDRF) 从社会、经济、实物、人力 4 个资本和 4 个防灾阶段矩阵构建的社会灾害韧性评价指标体系<sup>[23]</sup>，验证评估方法的可靠性和有效性。CUTTER 等<sup>[24]</sup>从灾前社区状况、灾害本身特性以及吸收能力构建基于地点的灾害韧性模型 (Disaster Resilience of Place Model, DROP)，该模型适用于迅速发生的灾害事件或缓慢的累积性冲击事件。③城市社区视角认为社区是组成城市的基本单元，在灾害和扰动面前首当其冲，直接决定城市的总体韧性水平。REED 等<sup>[25]</sup>构建人口 - 生态 - 政府服务 - 基础设施 - 社区竞争力 - 经济 - 社会韧性框架 (The PEOPLES Resilience Framework)，用预备量与脆弱性的比值对城市基础设施进行评估。FRANCIS 等<sup>[26]</sup>构建韧性矩阵框架 (Resilience Matrix Framework, RM)，应用范围广。④城市治理视角主要是将应急管理体系与城市规划相结合，对韧性现有状态做评价。CUTTER 等<sup>[27]</sup>从生态、机构、社会、经济、基础设施和社区资本六个方面构建社区基线韧性指数 (Baseline Resilience Indicators for Communities, BRIC) 以定量测量社区韧性。洛克菲勒集团提出城市韧性指标体系框架 (City Resilience Index, CRI)<sup>[19]</sup>，包含 4 个维度，12 个韧性城市目标，并选取 156 个指标对城市进行综合评价。修春亮等<sup>[28]</sup>从地理学和景观生态的角度，构建基于“规模 - 密度 - 形态”的三维城市韧性评估框架，从城市基本特征衡量城市的宏观发展。总体来看，上述研究为城市韧性思路、评估及实证研究提供了借鉴。学界对城市韧性框架内涵也从单一扰动向多重扰动、基础设施向人文层面、静态测度向过程测度的转变。

表 1 各阶段“韧性”内涵和特征

韧性观点	韧性内涵	本质目标	系统特征	平衡状态
工程韧性	不改变系统的结构和功能，恢复到初始状态的能力	恢复初始稳态	有序、线性	单一稳态
生态韧性	改变系统的结构和功能，达到新稳态的能力	塑造新稳态	复杂、非线性	多个稳态
演进韧性	不断调整自身结构和发展状态，实现可持续适应学习的能力	学习与创新，逐步适应	混沌、不确定系统	不再追求稳态
复合韧性	不断调整自身结构和发展状态，实现内部系统协调的能力	学习与创新，协同联动	联动、混沌、不确定	不再追求稳态

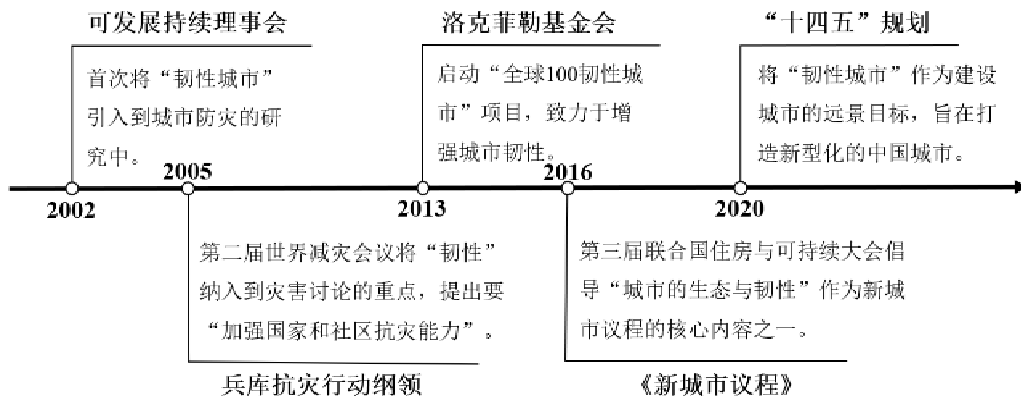


图 1 韧性城市研究的时间节点

表 2 城市韧性理论框架总结

分类	框架名称	框架内容	优势	局限性
复杂适应性视角	“适应性循环”模型框架	更新阶段; 成熟阶段; 开发阶段; 释放阶段	揭示韧性理论核心是周期性和适应性	定性框架
	RATA 框架	韧性维度; 适应性维度; 转变维度	准确识别多维度指标并明确其相互作用	指标选取具有主观性、无定量指标
	HES 框架	人类与环境	内因机制, 多重反馈的考量	缺乏具体指标评价
风险灾害视角	CDRF 框架	社会资本; 经济资本; 实物资本; 人力资本	对评估方法的可靠性和有效性进行评估	权重主观性强; 没有评估灾害恢复的能力
	DROP 框架	生态; 社会; 经济; 制度; 基础设施; 社区能力	适用于迅速发生的灾害事件或缓慢的累积性冲击事件	缺乏多重扰动对韧性影响的考量
城市社区视角	PEOPLES 框架	人口及其结构; 生态; 政府服务; 基础设施; 生活方式和社区竞争力; 经济发展; 社会文化资本	适用各个尺度的韧性评估; 在时空上形象地把韧性相互作用的各个领域结合起来	人口及其结构、基础设施、经济发展相关指标数据没有进行互联
	RM 框架	基础设施; 通信; 认知; 社会	社区内部人员评估, 针对性强; 适用范围广	指标较少; 权重的定性定量换算主观性强
城市治理视角	BRIC 框架	基础设施; 生态系统; 机构; 经济; 社会; 社区资本	易于理解; 方法透明; 便于决策	数据不连续且不具有时效性
	CRI 框架	健康与福祉; 经济与社会; 城市体系与服务; 领导力与战略	注重获取一手资料	韧性系统的动态变化分析不足
	“规模-密度-形态”框架	规模维度; 密度维度; 形态维度	将景观生态思想引入到城市韧性当中	缺乏经济、社会组织等其他城市子系统的考虑

## 2.2 城市韧性定量评价方法

城市韧性评价是研究韧性的关键。当发生扰乱后, 亟须感知城市恢复到原来状态的时间和过程, 但如何在扰乱前准确预知城市韧性并做好准备更为关键。城市韧性评价一方面能加深对城市韧性结构的理解, 另一方面能根据城市韧性为城市做合理的规划。尽管学术界对城市韧性评估没

有统一的衡量标准, 但通过选取与城市韧性相关的指标, 为量化城市韧性提供了一种合理科学的量化评价方法。目前常用的城市韧性量化评估方法有综合指数法、函数模型法、韧性网络法、韧性成熟度模型(RMM)、GIS 分析法、情景模拟法、机器学习法等, 表 3 为城市韧性定量评估方法总结表。

表 3 城市韧性定量评估方法总结

评估模型	优点	缺点	应用范围
层次分析法	对复杂问题、多种信息和数据进行多层次分析	主观随意性大	复杂问题以及多源数据的情况, 适用范围较广
主成分分析	数据可降维, 提高评价结果的区分	指标自身的重要性缺少考虑	同上
熵权法	指标权重比较客观	过度依赖样本数据	同上
模糊数学模型	问题框架和属性不受评价集合影响	对指标权重的主观性较强	指标较少、数据源离散
TOPSIS 法	充分利用原始数据, 对数据分布、指标数量没有限制	正、负理想解中垂线上点的优劣难以确定	指标重要程度的确定
函数模型法	明确构成要素间的相互作用, 能解释韧性的成因	对韧性概念及构成要素间的相互关系还未统一观点	基础设施或者工程韧性
韧性网络法	能反映城市各组成系统间联系强度的能力	存在信息误差、联系不真实等问题	网络韧性、流域、交通韧性
韧性成熟度模型	对系统的过程及复杂问题有较好的解释	空间上模拟相对不足	系统迭代过程和复杂问题
GIS 空间分析	图层可叠加, 分析结果能可视化	管理数据困难, 难以反映不同要素对整体韧性的影响	城市韧性空间演变分析
情景模拟法	可模拟多个要素作用下的城市韧性状况	缺少对现实问题适应性的关注	城市韧性的模拟分析
BP 神经网络	擅长解决非线性, 内部机制复杂问题	在训练时难以找到全局最优	数据量大, 城市韧性的预测
随机森林	能很好处理离散数据和连续数据	运算量巨大	同上

(1)综合指数法。综合指数法是从城市韧性特征、城市系统构成、灾害发生过程等方面构建指标因子建立评价指标体系,然后选取相应的数学方法计算城市韧性指数,以达到韧性量化的目的。其中计算指标体系权重的方法有层次分析法、主成分分析法、熵权法、模糊评价法和逼近理想解排序法(TOPSIS)等。

层次分析法(AHP)是将求解问题拆分为多个不同的层次,各层次下选取若干因素指标,各指标两两比较,构建判断矩阵为变量赋值,属于主观赋权。张明斗等<sup>[29]</sup>利用层次分析法,测算了长三角城市群城市韧性与经济发展水平,探讨城市韧性与经济发展间的协调性。张靖岩等<sup>[30]</sup>利用层次分析法,评估了多种灾害下特大城市的安全韧性。AHP能够对多种信息和数据进行处理,对复杂问题进行多层次分析,但主观随意性较大,对评估结果有较大影响。

主成分分析法是将多个指标通过线性变换,选取少量重要指标的降维多元统计分析方法,用于客观地确定综合指标权重,但对指标自身的重要性缺少考虑。MAIKO等<sup>[31]</sup>利用主成分分析法对日本水田市的风险进行排序,评估气候变化与自然灾害之间的因果关系。程皓等<sup>[32]</sup>采用主成分分析法定量评估中国十大城市群韧性和环境压力的关系。李宏薇等<sup>[33]</sup>从社会、经济、管理和技术四个维度构建评价指标体系,利用主成分分析法确定指标权重,对珠江三角洲的城市灾害恢复力进行评估。

熵权法根据数据指标离散程度来综合评价结果的影响大小,该方法能根据指标包含的信息量多少,客观确定权重。CHEN等<sup>[34]</sup>基于多维视角,运用熵权法建立黄河流域城市恢复力综合评价指标体系并分析其时空特征及其影响因素。罗慧等<sup>[35]</sup>采用熵权法并结合问卷调查和访谈资料,对秦岭区域农村社区气候韧性进行定量评估,发现经济韧性在地区间差异性最为明显。叶陈雷等<sup>[36]</sup>以琴亭湖附近典型社区为研究对象,用熵权法分析海绵城市建设与湖库联合调度下片区的内涝响应。

模糊数学法根据模糊数学中的隶属度理论把具有模糊概念的对象,通过精确的数字作出合理的量化评价。但指标权重主观性较强,且通过最大隶属度原则所得到的最大值和次大值评价结果相近时,评价结果的精度会降低。史永亮等<sup>[37]</sup>采用模糊数学法解决了江苏省大丰市城市生态健康评价标准的问题。杨沛等<sup>[38]</sup>从生态风险变化的角度出发,利用模糊数学法对深圳河流域生态风险指数进行计算,并探讨城市化对生态环境的影响。

逼近理想解排序法通过正、负理想解的距离对多指标进行相对排序,指标越靠近正理想解且远离负理想解则排序越靠前。TOPSIS能充分利用原始数据,减少信息损失,而且对数据分布、指标数量没有限制。陈长坤等<sup>[39]</sup>利用TOPSIS建立韧性评估模型,定量评估了武汉市2009—2015年雨洪灾害的能力,有利于提高城市韧性评估结果的准确性。张永领等<sup>[40]</sup>采用TOPSIS方法对上海市

18个区县的自然社会灾害脆弱性进行了评价。

(2)函数模型法。函数模型法是运用数学理论,将城市韧性问题抽象成数学问题建立韧性评价模型,根据函数性质来进行定量评价。BRU-NEAU等<sup>[41]</sup>从工程韧性的角度构建韧性曲线评价模型,通过绘制基础设施性能随时间变化的曲线来描述系统性能恢复至原来状态的抗震韧性。在此基础上CIMELLARO等<sup>[42]</sup>对该模型进行改进,认为系统性能存在超量恢复或未恢复到系统原来的韧性水平,并以性能曲线与横纵坐标围成的面积表示韧性数值。OUYANG等<sup>[43]</sup>认为韧性水平与系统本身能承载的最大受灾水平有关,于是对性能曲线进行改进,强调应以曲线围合的面积与未发生灾害情况下的面积之比表征韧性。仇保兴等<sup>[44]</sup>基于复杂适应系统理论特征,从扰动因子、脆性因子、韧力因子构建城市系统韧健度函数模型,以便对城市韧性度量。

(3)韧性网络法。韧性网络分析法源自复杂网络理论,分析不同网络节点属性和网络节点间的关系,主要是基于大数据或地理信息技术支持下网络构成特点来评估城市网络韧性。侯兰功等<sup>[45]</sup>借助Ucinet网络分析工具从3个维度6个指标对成渝城市群网络结构韧性演变进行研究。彭翀等<sup>[46]</sup>利用Gephi网络分析工具评估了长江中下游城市群网络的结构韧性能力及其空间特征。魏石梅等<sup>[47]</sup>以全国346个地级市及以上城市为研究对象,基于大数据技术从城市节点和网络层面对其层级性和匹配性进行测度。该方法能反映出网络节点间的结构韧性程度,但仍存在数据获取困难、信息误差大等缺陷。

(4)韧性成熟度模型(RMM)。在城市化进程中,城市容易遭受自然、人为等一系列冲击压力的影响,JOSUNE等<sup>[48]</sup>从城市需要经历的五个阶段(开始、中级、高级、强健、更高级)开发了一套韧性成熟度模型(RMM),为城市各阶段提供了实施韧性结构过程的路线图,以帮助城市评估当前韧性能力并确定需要实施的政策以提高韧性水平。RAQUEL等<sup>[49]</sup>认为城市韧性建设需要城市不同利益者参与其中,明确地方政府在此过程中需要采取的步骤,RMM可以为此提供指导,以协作和网络、意识和承诺、学习、培训和准备四项原则让各方利益者参与其中,现已对六个不同欧洲城市的半结构化访谈进行开发和验证。

(5)GIS分析法。GIS空间分析是城市韧性评价中可视化的重要工具,利用地理信息系统中的空间分析功能对空间数据进行处理,以获取数据当中的时空特征信息。孙阳等<sup>[50]</sup>从社会生态系统的角度,利用GIS空间分析和叠加分析对长三角地区16个地级市的韧性程度和空间分布作出评价。马飞等<sup>[51]</sup>利用GIS分析了关中平原城市群的城市韧性及时空演变。该方法将不同要素层进行空间叠加,使得韧性测度过程直观,结果容易解释,适用于多种风险背景下的韧性评价,能直观反映城市韧性的空间差异性。

(6)情景模拟法。情景模拟法是城市韧性模拟研究的有效途径,通过分析城市韧性的作用机理、特征、城市当前状态和灾害发生情况的基础上,

设置不同参数和变量对城市未来的韧性进行情景模拟。张行等<sup>[52]</sup>运用有序加权平均法, 对生态脆弱区社会-生态景观韧性进行模拟, 通过不同权重设置情景偏好, 预测了“不可持续导向型”“维持现状型”和“可持续导向型”3种情景的未来发展。BOTTERO 等<sup>[53]</sup>基于系统动力学模型, 从“惯性场景”和“战略场景”两种不同的城市情景模拟了意大利都灵市地区的城市韧性随时间变化的影响。

(7) 机器学习法。BP 神经网络是一种多层状的人工神经网络, 它通过样本训练进行反复学习来限制误差的大小, 在预测非线性问题上具有较高的实用性和精度, 能够结合评价指标客观准确地进行定性和定量分析。周振宏等<sup>[54]</sup>采用熵值法和 BP 神经网络综合建模法对合肥都市圈 10 年的城市恢复力进行定量评价。孔家辉等<sup>[55]</sup>利用 BP 神经网络对浙江省各地级市城市韧性进行定量评价, 并揭示城市韧性空间分布特征与发展规律。

随机森林通过多棵决策树形成森林, 其优点在于样本和特征的随机, 克服了决策树过度拟合问题。不足之处在于, 当数据集维度过低时不如高维数据训练效果好, 当数据量过大时, 对部分属性值不敏感。崔东文等<sup>[56]</sup>采用随机森林回归算法对水生态文明评价模型。程朋根等<sup>[57]</sup>利用随机森林算法对洪涝灾害数据指标进行特征分析, 根据重要性定量完善了指标权重的评估。吴立志等<sup>[58]</sup>引入随机森林算法优化初选 14 个火灾风险指标, 以济南市区为例, 证实随机森林模型精度较高, 可用于对指标的客观赋权。

综上, 城市韧性量化评价方法具有如下特点: 评估方法逐渐从静态测度向动态测度、单一韧性计算向时空演变、数理分析向多学科交叉地转变。但评估方法总体上还存在一些问题: ①重视结果, 忽视过程, 现有评价方法多是以计算城市韧性结果作为导向, 忽视城市韧性在受到扰动过程中的具体评价方法; ②多数评价方法将评价结果作为城市韧性研究的最终目的, 而不进行后续可靠性检验, 使得城市韧性研究不完整; ③大部分评价方法较少关注城市韧性作用机制和多尺度评价, 忽视城市韧性要素间相互作用, 仅考虑单一尺度范围的韧性评价结果。因此, 城市韧性量化评估方法的选取, 需要综合考虑原始数据、评价尺度、用途目的以及指标选取等多方面因素, 其方法好坏直接影响评价结果精度。

### 3 城市韧性评价指标

评价指标体系选取是否合理对城市韧性评估至关重要, 合理科学的指标能更真实、精确地反映城市抵御灾害的能力。城市作为复杂系统, 无法将所有影响城市韧性的指标考虑在内, 因此综合指标的选取应遵守科学规范性、系统性、导向性、相互独立性和可操作性原则。

本文对国内外韧性城市评价指标进行梳理, 发现 BURTON<sup>[59]</sup>、CUTTER<sup>[60]</sup>、李亚<sup>[61]</sup>、JOERIN<sup>[62]</sup>、白立敏<sup>[63]</sup>、张明斗<sup>[29]</sup>等国内外学者在构建韧性城市评价指标方面具有代表性。为了便于分类理解, 以韧性基线模型为理论依据, 从经济、社会、生

态、基础设施、组织制度等 5 方面来归纳总结韧性量化评价指标(设定为一级指标), 并在它们下面整理出可以量化操作的二级指标, 共 32 个因子(表 4), 这些指标可以作为未来城市韧性量化评估的参考。

经济韧性表现为城市面对不确定因素时经济所具有的稳定性<sup>[64]</sup>。良好的经济基础不仅能为灾后城市恢复提供资金保障, 而且有利于解决灾后居民就业等问题, 是城市韧性升级和可持续发展的基础和动力。对此从经济发展水平、经济稳定、经济结构、经济效率、经济潜力等方面选择 6 个指标。社会韧性表现在城市遭遇冲击时社会所具有的保障力和城市发展潜力, 可从医疗、交通、教育、就业、人口结构等方面选取 7 个指标。生态环境是城市可持续发展的空间载体。当城市遭遇压力时, 自然生态系统能更快速从中恢复过来, 而人主导的建设用地恢复力则较低, 因此生态韧性是表征城市韧性的重要因素。对此从绿化、建成区面积、污水处理率等方面选取 7 个指标。基础设施属于城市的人工环境, 为社会发展和人的生产生活提供了保障, 基础设施越完善, 其韧性就越强。对此从管道、通信、电力、食品等方面选取 7 个指标。组织制度韧性在提升城市韧性与区域转型方面有重要作用<sup>[65]</sup>, 政府决策和行为对城市发展起着支配作用, 制度完善和组织协助决定了城市应对灾害的走势, 将灾害损失降低到最低。在疫情时期制度发挥着重要作用, 但缺乏应对风险的专业性、物资储备缺乏、灾后社区人员心理恢复难等问题。对此从制度制定、社区群体、非政府组织等方面选取 5 个指标。

综上, 对城市韧性评价指标选取结果进行综合分析, 经济、社会、生态、基础设施等维度易计算的定量指标适用于大部分评估方法, 多数文献也将这些指标纳入到城市韧性评估体系中。对于没有数据记录或者难以用数据分析的定性指标, 如居民身心健康程度、食品供应能力等指标通常利用模糊数学法将定性概念转化为定量描述, 或者利用 GIS 空间分析法对不同指标进行可视化分析, 或者选择其他指标来进行替代。在组织制度维度中, 以定性指标居多, 因此大部分文献直接忽视组织制度对城市韧性的影响, 或将部分指标归纳到其他维度当中。合理的韧性城市评价指标体系是城市韧性定量评估结果可靠性的重要保证。

通过上述分析, 目前城市韧性量化评价指标具有获取成本低、方便横向对比、适用于大中尺度区域的特点, 但总体上还存在以下几个问题: ①现有指标大多是借鉴国外社区韧性理论, 指标构成存在一定的冗余性且存在部分定性指标, 无法用公式或数据来度量; ②指标间相互依赖关系常被忽视, 所选指标不能反映指标间内在联系, 指标与指标之间既要相互关联、相互依存, 也要避免各指标之间相互重叠, 否则不能很好地表示城市韧性各要素的特征和状态; ③指标选取缺乏对压力源的考虑, 未深入剖析多重扰动下指标之间的相互作用; ④国外指标多是从组织制度和社区方面考虑, 更加重视人在城市系统以及灾后恢复中的作用; 国内指标则集中研究基础设施和生态对城市的影响, 忽视人的主观能动作用。

表 4 城市韧性量化评价指标

一级指标	二级指标	指标含义	属性
经济	地均 GDP/万元	反映地区真实的经济发展水平	+
	城乡收入比/%	反映经济运行状况的稳定	+
	第三产业占 GDP 比重/%	反映经济结构合理程度	+
	对外贸易依存度/%	反映地区对外部经济的依赖性	-
	财政收入增长率/%	反映经济应对冲击措施完善能力	+
	高新技术产业增加值占比/%	反映经济发展在未来的潜力	+
社会	社会保障支出占财政支出比重/%	反映社会保障的完善程度	+
	灾害保险参保率/%	反映人对灾害的重视程度	+
	每万人拥有医生数/(人/万人)	反映社会对人口健康保障能力	+
	每万人在校大学生人数/(人/万人)	反映社会系统的潜力	+
	人口老龄化比例/%	反映社会人口的结构	-
	失业率/%	反映失业对社会系统的冲击	-
	互联网普及率/%	反映社会系统信息技术的融入度	+
生态	建成区绿化覆盖率/%	反映生态对灾害的自然防御能力	+
	建成区占地面积比/%	反映人对生态的利用程度	+
	工业废水排放达标率/%	反映工业排放对生态的冲击力	+
	每平方公里二氧化硫排放量/(t/km <sup>2</sup> )	反映工业废气对生态的影响	-
	工业固体废物综合利用率/%	反映工业资源的回收利用率	+
	生活垃圾无害化处理率/%	反映城市对垃圾的处理能力	+
基础设施	生活污水集中处理率/%	反映城市处理生活污水的能力	+
	人均道路面积/(m <sup>2</sup> /人)	反映道路资源的合理配置	+
	排水管道密度/(km/km <sup>2</sup> )	反映排水管道排水的能力	+
	每万人拥有公共汽(电)车数/(辆/万人)	反映公交车对人流量的疏导能力	+
	人均日用电量/((kW·h)/d/人)	反映电资源消耗对工程系统的压力	-
	人均日用水量/(L/d/人)	反映水资源消耗对工程系统的压力	-
	防灾减灾所面积比/%	反映基础设施的完善程度	+
组织制度	食品的供应能力	反映物资储备的能力	+
	单位负责人的比例/%	反映组织管理人员的参与程度	+
	政府机构的密度/%	反映组织体系的协调能力	+
	市民服务队参与人口比例/%	反映市民灾后抢救的参与度	+
	政府防灾支出/万元	反映政府对灾害的重视程度	+
	社区居民身心健康程度	反映居民灾害后的身心健康状态	+

#### 4 未来城市韧性量化评估研究趋势

目前我国学者对韧性城市评估取得了一定的成果,但韧性理论应用于城市研究仍有很大的提升空间。现有评估模型和评价指标大多是对城市系统的总体评估,缺乏对城市韧性压力源与演变机制的分析。基于此,未来韧性城市研究重点将从以下几个方面展开。

(1)多学科、多尺度的交叉研究。城市作为复合系统,不能只靠某一学科的思维对城市韧性进行研究,未来韧性研究需要从城市规划、生态学、社会学、地理学、灾害学等一单学科向多学科的交叉融合。城市韧性研究尺度范围包含全国<sup>[66]</sup>、城市群<sup>[67]</sup>、省域、社区<sup>[68]</sup>等不同层面,但国内研究多集中于某一具体的尺度层面,很少进行综合考虑。荷兰、日本、美国根据自身国情分别建立“国家-省级-市级”“国家-地域-社区”“城市-

社区”多尺度韧性规划。因此,我国应该根据自身情况,制定多尺度韧性框架,使得每个层面都有具体的韧性策略。

(2)完善韧性城市评价体系。现有评价系统大多考虑社会、经济、生态、基础设施,忽略城市规划<sup>[69]</sup>、制度机制、社会公平与人的意识<sup>[70]</sup>在构建韧性城市评价体系中的重要作用。增强城市抵御风险的能力不仅需要过硬的基础设施、生态、经济的有力保障,还需要建设更加透明、清晰、合理的组织制度。将组织制度纳入城市韧性评价体系中,量化和可视化组织制度因子如何与城市韧性相互作用,使政策干预、制度管理在提升城市韧性方面起到持久作用。尤其新冠爆发以来,有序的城市管治和完善的机制表现出巨大的优势,也为疫情后时代城市的恢复提供了保障。

(3)评价指标选取和相互作用。现有评估指标逐渐趋向定量分析,但借鉴国外评价标准,存在数据难以获取,缺乏科学论证,指标权重确定主观性强,对指标间相互作用分析不足等问题。收



集完整的数据和科学合理选取指标仍是研究的重点。通过采用线性回归模型<sup>[71]</sup>、SEM 模型<sup>[72]</sup>、二元 Logit 模型<sup>[73]</sup>等方法对韧性城市各要素间的相互作用进行分析, 来探究指标对城市韧性的作用机制和影响机理是未来研究的热点。

(4) 多重扰动对韧性城市评估模型的影响。城市韧性受到来自多方的影响, 由于不同类型的风险扰动作用的时间、强度、频率不同, 导致城市遭受危害程度不一样, 多种灾害的交织会进一步扩大灾害的破坏力。目前多以突发性灾害气候变化等单一扰动为研究对象, 而对多重扰动的韧性城市评估研究不足, 表现为未深入剖析多重扰动间的耦合效应、多重灾害冲击程度对城市的影响。结合多重扰动对城市韧性的动态过程、作用机制和系统多反馈的分析需进一步研究。

(5) 注重韧性时空量化分析。不同城市因地理位置、经济水平、政策制度不同, 而比较多个城市的韧性差异意义不大, 研究同一城市不同区域的韧性状况, 对城市发展更为重要。从单一时间断面对城市韧性研究, 不能发现城市韧性随时间变化的趋势, 为城市韧性发展找到规律。随着 3S 技术在城市韧性评估中的不断深入, 利用大数据将传统的数理特征分析与时空分析方法相结合, 探索韧性城市空间演变特征和规律, 以达到研究韧性城市空间的整体特征。

(6) 城市韧性与海绵、数字孪生城市的结合。我国海绵城市的规划设计与建设管理仍是以防灾减灾为主, 如何提升城市蓄水效率、城市水生态水平、减少雨洪灾害的发生仍是海绵城市的主要内容。因此, 将城市韧性治理纳入其中, 可优化海绵城市的实践方案为海绵城市的建设提供全新的思路。同时, 在数字信息化时代, 运用数字化技术治理城市、提高城市智能化、化解城市风险成为最佳选择。以城市韧性作为理论, 数字孪生作为技术, 将能反映城市韧性的经济、环境、基础设施等要素, 依靠数字孪生技术构建具有关键环境基础设施的数字孪生系统, 为数据资源的管理、生态环境的优化、基础设施的维护提供参考依据。

## 5 结语

当前, 我国城市仍处于快速发展阶段, 城市面临着各种自然灾害、人为灾害和累积性冲击, 制约着城市健康发展, 如何确保城市安全与稳定, 增强城市抵御风险的能力引发人们的思考。梳理韧性城市的概念, 剖析韧性城市的研究状况有助于理解城市在遭受灾害的全程反应, 总结归纳城市韧性量化评估方法, 有助于为提升城市韧性评价提供方法和路径。通过对相关文献梳理表明, 城市韧性量化评估可以从经济、社会、生态、基础设施、组织制度五个维度构建城市韧性评价体系, 但在实际应用中, 应根据实际情况对指标体系进行相应调整, 如何选择指标因子并如何对其确权是评价的关键; 未来研究重点应考虑如何从时空角度、多重扰动影响, 以及与数字城市结合等方面开展城市韧性研究。学习发达国家的经验, 结合国内的实际情况, 建设更加安全、可靠、更具有韧性的城市应成为国内城市发展的目标。

## 参考文献:

- [1] KENNEDY C A, IBRAHIM N, HOORNWEG D. Low-carbon infrastructure strategies for cities [J]. *Nature Climate Change*, 2014, 4(5): 343-346.
- [2] 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.
- [3] PIZZO B. Problematising resilience: Implications for planning theory and practice [J]. *Cities*, 2015, 43(3): 133-140.
- [4] MARJOLEUN S, BAS W. Building up resilience in cities worldwide - Rotterdam as participant in the 100 Resilient Cities Programme [J]. *Cities*, 2016, 61(1): 109-116.
- [5] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(10): 1717-1731.
- [6] 杨敏行, 黄波, 崔翀, 等. 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*, 2016, 227(1): 48-55.
- [7] 魏治, 修春亮. 城市网络韧性的概念与分析框架探析 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(3): 488-502.
- [8] 韩自强, 刘杰, 田万方. 城市韧性的测量指标: 基于国际文献的系统综述 [J]. *广州大学学报(社会科学版)*, 2022, 21(6): 131-144.
- [9] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems [J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1973, 4(4): 1-23.
- [10] BERKES F, FOLKE C, COLDING J. Linking Social and Ecological Systems: Management Practices and Social Mechanisms for Building Resilience [J]. Cambridge University Press, 1998, 24(2): 230-233.
- [11] CARPENTER S, WALKER B, ABEL A N. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? [J]. *Ecosystems*, 2001, 4(8): 765-781.
- [12] FOLKE C. Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses [J]. *Global Environmental Change*, 2006, 16(3): 253-267.
- [13] 容志. 构建卫生安全韧性: 应对重大突发公共卫生事件的城市治理创新 [J]. *理论与改革*, 2021, 242(6): 51-65, 152.
- [14] International Strategy for Disaster Reduction. Living with risk: a global review of disaster reduction initiatives [M]. New York and Geneva: Geneva (Switzerland) UN, 2004: 69-72.
- [15] HOLLING C S, GUNDERSON L H. Panarchy: understanding transformations in human and natural systems [M]. Washington, DC: Island Press, 2002: 25-62.
- [16] NORTON S G. United Nations Centre for Human Settlements, An Urbanizing World: Global Report on Human Settlements, 1996 [J]. *Economic Development and Cultural Change*, 1998, 47(1): 215-218.
- [17] MOTESHARREI S, RIVAS J, KALNAY E, et al. Modeling Sustainability: Population, Inequality, Consumption, and Bidirectional Coupling of the Earth and Human Systems [J]. *National Science Review*, 2016, 3(4): 470-494.
- [18] 刘冰. 地方知识在社区减灾行动中的整合策略——基于四川省阿坝藏族羌族自治州的案例研究 [J]. *广州大学学报(社会科学版)*, 2016, 15(6): 19-27.
- [19] MOSER S, MEEROW S, ARNOTT J, et al. The turbulent world of resilience: interpretations and themes for transdisciplinary dialogue [J]. *Climatic Change*, 2019, 153(1/2): 20-44.
- [20] 石楠. “人居三”、《新城市议程》及其对我国的启示 [J]. *城市规划*, 2017, 41(1): 9-21.
- [21] O'CONNELL D A, WALKER B, ABEL N, et al. The Resilience, Adaptation and Transformation Assessment Framework: From Theory to Application [R]. Canberra, Australia: CSIRO, 2015: 31-44.
- [22] NYSTRÖM M, JOURFFRAY J-B, NORSTRÖM M A V, et al. Anatomy and resilience of the global production ecosystem [J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 98-108.
- [23] MANYENA S B. The concept of resilience revisited [J]. *Disasters*, 2006, 30(4): 434-450.
- [24] CUTTER S L, BARNES L, BERRY L, et al. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters [J]. *Global Environmental Change*, 2008, 18(4): 598-606.
- [25] REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for Assessing the Resilience of Networked Infrastructure [J]. *IEEE Systems Journal*, 2009, 3(2): 174-180.
- [26] FRANCIS R, BEKERA B. A metric and frameworks for resilience analysis of engineered and infrastructure systems [J]. *Reliability engineering & system safety*, 2014, 121(1): 90-103.
- [27] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions [J]. *Journal*

- of Homeland Security and Emergency Management, 2010, 7 (1): 1-24.
- [28] 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.
- [29] 张明斗, 冯晓青. 长三角城市群内各城市的城市韧性与经济发展水平的协调性对比研究[J]. 城市发展研究, 2019, 26(1): 82-91.
- [30] 张靖岩, 范乐, 张泽伟, 等. 多灾种下特大城市安全韧性影响评估研究与实践[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 7-12.
- [31] MAIKO E, AKIHIRO T. Application of Risk Perception Theory to Develop a Measurement Framework for City Resilience: Case Study of Suita, Japan[J]. Journal of Sustainable Development, 2016, 9(5): 33-33.
- [32] 程皓, 阳国亮, 纪晓君. 中国十大城市群城市韧性与环境压力脱钩关系研究[J]. 统计与决策, 2019, 35(7): 79-83.
- [33] 李宏薇, 徐永亮, 许尔琪, 等. 珠江三角洲的城市灾害恢复力评估[J]. 灾害学, 2019, 34(3): 209-215.
- [34] CHEN Y, SU X Y, ZHOU Q. Study on the Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Urban Resilience in the Yellow River Basin[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(19): 10231-10231.
- [35] 罗慧, 刘杰, 徐军昶, 等. 基于熵权法的秦岭区域农村社区气候韧性评价研究[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 111-118.
- [36] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 83-92.
- [37] 史永亮, 杨东峰, 王如松, 等. 基于 PSR 模型的大丰市城市生态系统健康综合评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 120-123.
- [38] 杨沛, 李天宏, 毛小琴. 基于 PESR 模型的深圳河流域生态风险分析[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2011, 47(4): 727-734.
- [39] 陈长坤, 陈以琴, 施波, 等. 雨洪灾害情境下城市韧性评估模型[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(4): 1-6.
- [40] 张永领, 游温娇. 基于 TOPSIS 的城市自然灾害社会脆弱性评价研究——以上海市为例[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 109-114.
- [41] BRUNEAU M, REINHORN A. Exploring the concept of seismic resilience for acute care facilities[J]. Earthquake Spectra, 2007, 23(1): 41-61.
- [42] CIMELLARO G P, ANDREI M - R, Michel Bruneau. Framework for analytical quantification of disaster resilience[J]. Engineering Structures, 2010, 32(11): 3639-3649.
- [43] OUYANG M, LEONARDO D - O, XING M. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36(2): 23-31.
- [44] 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.
- [45] 侯兰功, 孙继平. 复杂网络视角下的成渝城市群网络结构韧性演变[J]. 世界地理研究, 2022, 31(3): 561-571.
- [46] 彭翀, 林樱子, 顾朝林. 长江中游城市群网络结构韧性评估及其优化策略[J]. 地理研究, 2018, 37(6): 1193-1207.
- [47] 魏石梅, 潘竞虎. 中国地级及以上城市网络结构韧性测度[J]. 地理学报, 2021, 76(6): 1394-1407.
- [48] JOSUNE H, PATRICIA M, RAQUEL G, et al. Towards resilient cities: A maturity model for operationalizing resilience[J]. Cities, 2019, 84(1): 96-103.
- [49] RAQUEL G, JOSUNE H, LEIRE L. A maturity model for the involvement of stakeholders in the city resilience building process[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2016, 121(8): 7-16.
- [50] 孙阳, 张落成, 姚士谋. 基于社会生态系统视角的长三角地级城市韧性度评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(8): 151-158.
- [51] MA F, WANG Z H, SUN Q P, et al. Spatial - Temporal Evolution of Urban Resilience and Its Influencing Factors: Evidence from the Guanzhong Plain Urban Agglomeration[J]. Sustainability, 2020, 12(7): 2593-2593.
- [52] 张行, 梁小英, 刘迪, 等. 生态脆弱区社会—生态景观恢复力时空演变及情景模拟[J]. 地理学报, 2019, 74(7): 1450-1466.
- [53] BOTTERO M, DATOLA G, ELENA D A. A System Dynamics Model and Analytic Network Process: An Integrated Approach to Investigate Urban Resilience[J]. Land, 2020, 9(8): 242-242.
- [54] 周振宏, 胡琦, 朱庆山, 等. 基于神经网络综合建模的城市韧性测度研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2021, 43(6): 505-511.
- [55] 孔家辉, 邹逸江, 斯港杰. 基于 BP 神经网络与熵值法的浙江省城市韧性评估研究[J]. 宁波大学学报(理工版), 2022, 35(4): 85-92.
- [56] 崔东文, 金波. 基于随机森林回归算法的水生态文明综合评价[J]. 水利水电科技进展, 2014, 34(5): 56-60, 79.
- [57] 程朋根, 黄毅, 郭福生, 等. 基于多源数据的城市洪涝灾害风险评估[J]. 灾害学, 2022, 37(3): 69-76.
- [58] 吴立志, 陈振南, 张鹏. 基于随机森林算法的城市火灾风险评估研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 54-60.
- [59] BURTON C G. A validation of metrics for community resilience to natural hazards and disasters using the recovery from Hurricane Katrina as a case study[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015, 105(1): 67-86.
- [60] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. Global Environmental Change, 2014, 29(11): 65-77.
- [61] 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.
- [62] JOERIN J, SHAW R, TAKERUCHI Y, et al. Action-oriented resilience assessment of communities in Chennai, India[J]. Environmental Hazards, 2012, 11(3): 226-241.
- [63] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 77-87.
- [64] MARTIN R. Regional Economic Resilience, Hysteresis and Recessionary Shocks[J]. Utrecht University, Department of Human Geography and Spatial Planning, Group Economic Geography, 2012, 12(1): 1-32.
- [65] DAWLEY S, PIKE A, TOMANEY J. Towards the resilient region?: policy activism and peripheral region development[J]. SERC Discussion Papers, 2010, 25(8): 650-667.
- [66] 郑艳, 翟建青, 武占云, 等. 基于适应性周期的韧性城市分类评价——以我国海绵城市与气候适应型城市试点为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(3): 31-38.
- [67] 冯苑, 聂长飞, 张东. 中国城市群经济韧性的测度与分析——基于经济韧性的 shift-share 分解[J]. 上海经济研究, 2020, 38(5): 60-72.
- [68] 杨丽娇, 蒋新宇, 张继权. 自然灾害情景下社区韧性研究评述[J]. 灾害学, 2019, 34(4): 159-164.
- [69] DESOUSA K C, FLANERY T H. Designing, planning, and managing resilient cities: A conceptual framework[J]. Cities, 2013, 35(12): 89-99.
- [70] 李彤玥. 韧性城市研究新进展[J]. 国际城市规划, 2017, 32(5): 15-25.
- [71] SHI C, ZHU X, WU H, et al. Assessment of Urban Ecological Resilience and Its Influencing Factors: A Case Study of the Beijing - Tianjin - Hebei Urban Agglomeration of China[J]. Land, 2022, 11(6): 921-921.
- [72] LI X J, LI L L, LIN M C, et al. Research on Risk and Resilience Evaluation of Urban Underground Public Space[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(23): 15897-15897.
- [73] XU A F, CHEN J M, LIU Z H. Exploring the Effects of Carpooling on Travelers' Behavior during the COVID-19 Pandemic: A Case Study of Metropolitan City[J]. Sustainability, 2021, 13(20): 11136-11136.

## A Review of Urban Resilience Quantitative Assessment

CHENG Pengen<sup>1,2</sup>, FU Jianeng<sup>1</sup>, LI Congyi<sup>1</sup>, CHEN Xiaoyong<sup>1,2</sup>

(1. School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. Key Laboratory of Mine Environmental Monitoring and Improving around Poyang Lake, Ministry of Natural Resources, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** In the context of global environment changes, high-speed urbanization and the emergence of pandemics such as the COVID-19, term “resilience” has been proposed to provide a new development direction for



cities to fight against uncertain risks. The study of urban resilience has become an important research topic in the field of urban planning and management. Based on the study and analysis of existing research literatures, this paper reviews the research status of quantitative assessment of urban resilience from the perspective of origin, the framework and multiple factors affecting of urban resilience, including: ① Review and summarize the commonly used assessment methods of urban resilience quantitative, and select 12 representative methods for comparative analysis. ②32 urban resilience evaluation indicators are selected from the five dimensions; society, economy, infrastructure, system and ecology to construct an urban resilience evaluation index system and analyze the impact of indicators on urban resilience. ③The research hotspots and trends of the quantitative assessment of urban resilience are forecast in the future, that is, from urban resilience stressors, evolution mechanisms, multi-scale analysis, spatio-temporal quantitative analysis and the combination of digital twin cities to promote future research resilient cities.

**Keywords:** urban resilience; quantitative evaluation; assessment framework; assessment index

(上接第 104 页)

- [4] 吴立志, 吴彬航. 基于火灾数据的城市火灾时间特征研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(9): 1318-1322.
- [5] XIN J, HUANG C F. Fire risk assessment of residential buildings based on fire statistics from China[J]. Fire Technology, 2014, 50(5): 1147-1161.
- [6] 李国辉, 王颖, 原志红, 等. 火灾发生率与经济因素的时空相关性分析[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 111-115.
- [7] 夏泽龙, 李浩, 陈跃红. 城市火灾事件时空分布规律与关联规则挖掘[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(10): 1449-1453.
- [8] 王健. 火灾系统时空分布规律及相关性分析[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [9] 张海军. 河南省火灾影响因素的空间分析[J]. 地理科学进展, 2014, 33(7): 958-968.
- [10] 王清平, 李晓慧. 安徽省农村火灾地域分布特征及预防[J]. 辽宁工程技术大学学报(社会科学版), 2015, 17(6): 613-619.
- [11] 陈清望. 基于农村火灾大数据的传统村落消防对策研究: 以贵州为例[C]//共享与品质——2018 中国城市规划年会论文集(09 城市文化遗产受保护), 浙江杭州, 2018: 118-127.
- [12] 周会会, 孙晓宇, 苏文彬. 基于统计分析的云贵高原火灾特征研究[J]. 武警学院学报, 2018, 34(4): 21-25.
- [13] 韦益金. 火灾与聚落空间的调适研究: 以林略侗寨为例[D]. 桂林: 广西师范大学, 2013.
- [14] 周红, 李百浩. 山地历史小城镇的消防事故成因及其适应性对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 76-80.
- [15] 薛薇. 统计分析与 SPSS 的应用(第 3 版)[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2011: 188-189.
- [16] 刘天生. 国内木构古建筑消防安全策略分析: 古建筑火灾风险评估技术初探[D]. 上海: 同济大学, 2006.

## Distribution Characteristics of Mountainous Rural Fire and Its Correlation with Village Factors ——Take Southeastern Guizhou as an Example

GAO Mingming<sup>1,2</sup>, WANG Zhu<sup>2</sup>, QIU Zhi<sup>2</sup>, HUO Jiawen<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Urban Planning, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** It is necessary to explore the spatial and temporal differences of fire under the correlation of factors in mountain villages to reveal their fire disaster mechanism and build fire prevention system. Through the descriptive statistics and kernel density analysis of fire and village characteristics data from 2011 to 2020 in southeast Guizhou, the distribution characteristics of fire are obtained. Non-parametric test method is used to analyze the correlation between fire and fire village elements. The results show that ①the rural fires in southeast Guizhou showed prominent moderate agglomeration in terms of fire time and village elevation; In the fire space, fire cause, fire loss and other aspects of village attributes, it shows a high concentration. ②elevation, connectivity degree of wooden buildings, nationality, fire time, cause of the fire, the fire place on fire intensity show significant differences, elevation between 500-600 meters, the high connectivity degree of wooden building, She and Dong village, the fire occurs when people breaks, occurred in the residential, caused by smoking and playing with fire, are more likely to spread. ③There are significant differences in fire frequency among village ethnic groups. Miao, Gelao and She villages have higher fire frequency than other ethnic groups.

**Keywords:** rural fire; distribution characteristics; fire frequency; fire intensity; non-parametric test; southeastern Guizhou