

郭羽羽, 罗福周, 钟兴润. 基于熵权-正态云模型的城市安全韧性评估研究[J]. 灾害学, 2021, 36(4): 168-174. [GUO Yuyu, LUO Fuzhou and ZHONG Xingrun. Study on Urban Safety Resilience Assessment Based on Entropy Weight-Normal Cloud Model[J]. Journal of Catastrophology, 2021, 36(4): 168-174. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.028.]

基于熵权-正态云模型的城市安全韧性评估研究^{*}

郭羽羽¹, 罗福周¹, 钟兴润²

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 资源工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为了提升城市安全韧性建设, 综合考虑了城市安全韧性内涵及扰动力、吸收/适应力和恢复力等特征, 从经济韧性、社会韧性、基础设施韧性和生态环境韧性等4个维度建立城市安全韧性评估指标体系; 利用熵权法确定指标权重, 并划分韧性评估等级标准, 采用正态云模型构建城市安全韧性评估模型。最后, 以西安市为例验证模型的有效性。结果表明: 城市基础设施和生态环境韧性优于经济和社会韧性, 模型验证得到西安市综合安全韧性等级属于IV级, 即较高韧性。

关键词: 韧性; 城市安全韧性; 安全韧性评估; 熵权-正态云模型; 西安

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2021)04-0168-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2021.04.028

城市化高速运转为人类提供大量机会与服务的同时不可避免地给人类生存带来威胁与挑战。自然灾害、突发疾病等不确定性风险及人口集聚、交通阻塞、环境恶化等引发的“城市病”症状对城市安全产生严重的威胁, 如: 在新冠疫情的冲击下, 城市安全问题凸显且韧性表现出较大的差距。而安全作为保障经济持续、社会安定、人民安全及城市系统稳固的前提与关键, 全面地反映了一个城市的安全管理水平。2020年“十四五”规划提出推进以人为核心的新型城镇化, 加强城市更新与改造、防洪排涝, 打造安全韧性城市, 将韧性建设上升到国家可持续发展战略。

韧性最早应用于力学研究, 目前相关学者借助韧性理念在城市经济、生态及基础设施等方面取得相应成效。陈亦玮等将韧性应用于经济学领域, 通过测算城市经济韧性度并分析其作用机理^[1]; 唐明凤基于创新生态视角研究社区韧性及治理^[2]; 吕彪等探讨不同侵扰情境下城市道路韧性状态与演变过程^[3]; 李葛等构建PRS-BP神经网络框架分析城市安全^[4]; 陈为公等有效识别并分析影响城市灾害韧性的因素, 认为城市管制能力是最本根的影响因素^[5]。然而, 上述研究多集中于单一维度下的韧性测算、空间分异、路网性能及韧性因素分析等方面, 对于城市安全韧性等级评价方面的研究较少。

因此, 本文基于韧性概念及演变机理, 总结城市安全韧性内涵; 结合城市安全韧性特征、现状与特点, 建立城市安全韧性评估指标体系; 由于韧性城市建设及评估过程中涉及的不确定性因素众多, 为避免定性且模糊的评估过程, 引入云

模型理论实现定量化评估城市安全韧性水平, 为城市安全韧性评估提供可靠方法。

1 城市韧性内涵

1.1 韧性概念起源与演变机理

韧性起源于 resilio, 译为“反弹”, 尔后传入法国表示“恢复原状”之意。19世纪50年代, 韧性初次应用于力学研究, 强调系统受到外界冲击后能够恢复到原来状态的能力; 20世纪50至80年代, 韧性理念被广泛应用于心理学研究, 用来衡量压力状态下的心理韧性水平^[6]; 20世纪70年代, 加拿大生态学家 HOLLING 初次将“韧性”理念引入社会生态系统, 用来描述生态系统的稳态^[7]。

韧性理论从简单的力学系统逐渐演变为复杂的人类-社会生态系统, 经历了从工程韧性到生态韧性再到演进韧性两次认知型的转变。工程韧性基于物理学思维, 强调单一的稳态, 当系统受到扰动与破坏时能够迅速恢复至原始状态; 生态韧性修正了工程韧性传统的单一稳态, 强调多元化的动态稳定, 注重系统在改变内部结构与关键功能前的抵抗力与吸收力; 而演进韧性基于系统思维模式, 强调达到动态变化的非平衡状态, 当系统遭到破坏时能够持续的适应、学习形成新的适应系统^[8]。每一次的认知转变都是对韧性内涵的凝练与升华。

1.2 城市安全韧性概念

韧性理论经历深刻的转变, 其机理逐渐被渗

^{*} 收稿日期: 2021-04-22 修回日期: 2021-06-23

基金项目: 国家自然科学基金资助(51808424); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目一般项目-青年项目(2020JQ-690)

第一作者简介: 郭羽羽(1994-), 女, 汉族, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要从事工程经济与管理、资源型城市研究。

E-mail: 1215915066@qq.com

透到城市规划与安全建设中, 为城市的发展开拓新的视域与方向。近年来, 城市安全韧性的探索跨越了自然灾害、社会风险与管理等领域, 与此相关的定义也逐步深化与完善, 如 Godschalk 等强调城市安全韧性是物理系统和人类社区的可持续网络, 二者相互作用、相互影响^[9]; 洛克菲勒基金会认为城市安全韧性是城市中个人、社区、机构等经历各种慢性压力和急性冲击, 具备持续适应变化、自我学习的能力^[9]; 方东平等认为城市与其各类子系统受到外界干扰能够进行自我适应与调整, 并迅速恢复其基本功能, 通过不断适应应对不确定性风险^[10]。

不同学者对城市安全韧性内涵的界定各有差异, 但其具有共性, 即城市系统在受到外界扰动与破坏时, 具备持续适应变化与自我调整能力, 有效学习总结经验, 降低损失, 维持城市系统的安全运行与良性循环。

1.3 城市安全韧性特征

与传统城市应对扰动与冲击相比, 分析城市在外界压力下的表现状态, 城市安全韧性表现出如下特征。

(1) 多样性: 城市系统中结构和功能的多样性能提供更多应对危机的思路与方法, 减缓外界的冲击。

(2) 冗余度: 冗余设施作为应急设备对基础设施进行补充与替换, 确保城市系统正常运转。

(3) 适应性: 安全事件影响下, 城市系统具备持续适应外界变化与自我调整能力。

(4) 稳健性: 城市遭到扰动与冲击, 能维持系统相对完整与关键功能不被破坏。

(5) 恢复性: 城市系统在受到破坏后, 具备迅速恢复自身结构与基本功能运转的能力。

(6) 学习能力: 城市系统在外界扰动下能有效学习并总结经验, 调整自身结构应对不确定性变化。

(7) 整合性: 加强城市系统间的联系与协调发展, 发挥 $1+1>2$ 的功效, 提高城市安全韧性。

2 熵权-正态云评估模型

2.1 熵权理论

熵权法(Entropy weight method, EWM)的基本原理是根据评价指标信息熵值的大小确定客观权重, 评价指标反映的信息熵越小, 表明其提供的信息量越多, 则权重就越大^[11]。指标权重是表示城市安全韧性评估指标重要程度的权数, 为避免人为因素对指标的干扰与影响, 本文采用 EWM 计算各评估指标权重, 根据城市韧性的 n 个指标 m 年数据, 构建标准化处理后的韧性评估矩阵 $X = (x_{ij})(i=1, 2, \dots, n)$, 其中, x_{ij} 为第 i 个指标在第 j 年的指标值, 根据信息熵得出第 i 个指标的熵值 E_i :

$$E_i = - \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij} \ln x_{ij}}{\ln n} \quad (1)$$

由信息熵得出第 i 个指标的权重值 W_i :

$$W_i = - \frac{1 - E_i}{\sum_{i=1}^m (1 - E_i)} \quad (2)$$

即城市安全韧性评估指标权重矩阵为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

2.2 NCM 基本原理

1995 年李毅德院士基于概率测度空间提出正态云模型(Normal cloud model, NCM)理论, 旨在实现定性概念与定量数据之间的不确定性转换, 以解决定性概念中的模糊性与随机性问题^[12]。云模型具有一定的普适性, 目前已广泛应用于生态环境评价、脆弱性评价及员工绩效评估等方面^[13-15]。

正态云模型通过期望(Ex)、熵(En)、超熵(He)3 个数字特征将定性语言转换为云滴, 进行多次计算形成云图(图 1)。其中, 期望(Ex)表示云滴在云图空间的中心值, 熵(En)表示云滴在云图中的取值范围, 超熵(He)表示云滴的凝聚程度^[12], n 表示云模型循环计算次数, 即云滴的数量。

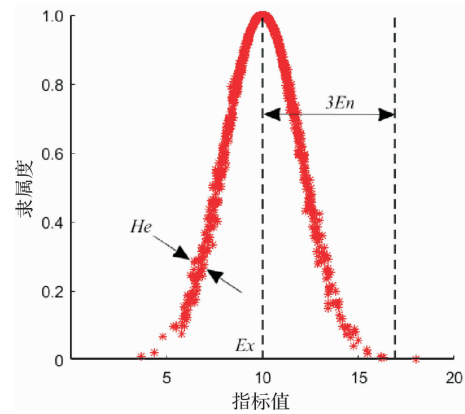


图1 正态云模型示意图

2.3 评估模型建立

(1) 建立城市安全韧性评估指标体系 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和韧性评估等级阈值 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_j\}$;

(2) 根据熵权理论, 确定韧性评估指标权重向量 W ;

(3) 构建隶属度矩阵 $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。其中, r_{ij} 表示评估指标 u_i 在对应评估等级 v_j 下的隶属度。指标 i 与对应评估等级 j 的上下边界值为 x'_{ij} 与 x''_{ij} , 计算特征值 Ex 、 En 、 He 。其中:

$$Ex = (x'_{ij} + x''_{ij})/2; \quad (3)$$

$$En = |x'_{ij} - x''_{ij}|/2.335; \quad (4)$$

$$He = k \quad (5)$$

式中: k 为常数, 一般通过实验取得。为了使评估结果具有较高可信度, 将正向云发生器循环 2 000 次, 取其平均值为最终隶属度。

(4) 评估结果。利用权重向量 W 与隶属度矩阵 R 进行模糊转换构建评估等级阈值 V 上的模糊子集 B :

$$B = WR = (b_1, b_2, \dots, b_n). \quad (6)$$

式中: $b_j = \sum_{i=1}^n w_i r_{ij}, j=1, 2, \dots, m$, 表示评估指标 i 对第 j 个评估等级的隶属度。依据最大隶属度原则, 选择最大隶属度对应的评估等级为最终评估结果。具体评估城市安全韧性等级流程(图 2)。

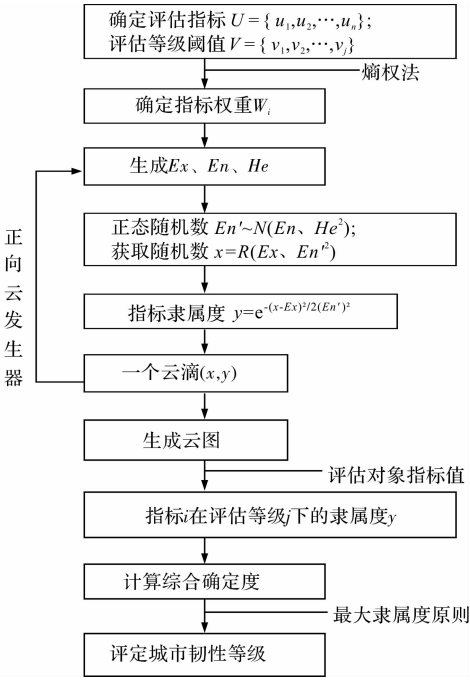


图2 城市韧性等级评估流程图

3 城市韧性评估指标体系

采用正态云模型理论选取评估指标，通过正

态云正向发生器将定性指标量化处理，降低了指标随机性与模糊性对评估结果的影响，能较为全面地反映评估指标的本质内涵。为客观评估城市安全韧性等级，基于韧性内涵、特征及城市现状，综合考虑各评估指标间的复杂关联，遵循科学性、系统性、独立性、可度量性等原则，构建城市安全韧性评估指标体系。

3.1 指标体系初建

(1) 指标初选。在充分考虑城市安全韧性内涵及扰动力、吸收/适应力和恢复力等特征的基础上，将经济、社会、基础设施、生态环境等4个维度作为安全评估指标的提取对象。深度分析国内外相关文献，通过词频统计方式筛选出研究次数不少于3次且具有代表性的指标，以问卷形式，对选取的指标进行调研，收集、分析并归纳出城市安全韧性评估指标体系初始框架。

(2) 指标优化。选取该领域相关专家进行访谈，对初始评估指标框架进一步补充与优化。由于指标间关系复杂、模糊，Delphi法无法测定指标间的相关性，指标意义可能存在重复表达，因此通过计算重要程度指数与变异系数判断各指标间的离散程度，认为重要程度指数低的指标相对较为次要、变异系数大的指标则认为可信度不高，此时指标需要被剔除。进行反复多次的遴选与优化，确定城市安全韧性评估指标体系(表1)。

表1 城市安全韧性评估指标体系

指标权重	准则层	子准则层	指标层	性质
经济韧性 x_1 (0.248)	扰动力(0.125)	单位GDP能耗 $x_{11}/(\text{t}/\text{万元})$	-	0.046
		人均GDP $x_{12}/(\text{万元}/\text{人})$	+	0.032
	吸收/适应力 (0.525)	城市安全资金投入比重 $x_{13}/\%$	+	0.045
		经济调节能力 $x_{14}/\%$	+	0.040
	恢复力 (0.354)	第三产业占GDP比重 $x_{15}/\%$	+	0.055
		城市安全科技创新应用能力 $x_{16}/\%$	+	0.072
社会韧性 x_2 (0.204)	扰动力(0.269)	人口密度 $x_{21}/(\text{人}/\text{km}^2)$	-	0.021
		城镇登记失业率 $x_{22}/\%$	-	0.019
	吸收/适应力 (0.448)	社会保险指数 $x_{23}/\%$	+	0.025
		社会保障占财政支出比重 $x_{24}/\%$	+	0.048
	恢复力 (0.282)	公共安全占财政支出比重 $x_{25}/\%$	+	0.038
		每万人在校大学生数 $x_{26}/\text{人}$	+	0.043
基础设施韧性 x_3 (0.314)	扰动力(0.141)	公共安全管理与社会组织人员占比 $x_{27}/\%$	+	0.035
		人均日生活用水量 x_{31}/L	-	0.026
	吸收/适应力 (0.432)	建成区排水管道密度 $x_{32}/(\text{km}/\text{km}^2)$	+	0.054
		人均城市道路面积 $x_{33}/(\text{m}^2/\text{人})$	+	0.026
	恢复力 (0.427)	安全应急资源与设施占比 $x_{34}/\%$	+	0.035
		城市安全建设维护支出 $x_{35}/\text{亿元}$	+	0.061
生态环境韧性 x_4 (0.234)	扰动力(0.194)	每万人拥有的病床数 $x_{36}/\text{张}$	+	0.040
		每万人拥有公共汽车量 $x_{37}/\text{标台}$	+	0.018
	吸收/适应力 (0.462)	工业废水排放强度 $x_{41}/(\text{T}/\text{万元})$	-	0.026
		一般工业固体废物综合利用率 $x_{42}/\%$	+	0.031
	恢复力 (0.344)	生活垃圾无害化处理率 $x_{43}/\%$	+	0.059
		空气质量达标天数比率 $x_{44}/\%$	+	0.034
		建成区绿化覆盖率 $x_{45}/\%$	+	0.045
		人均公园绿地面积 $x_{46}/(\text{m}^2/\text{人})$	+	0.026

表 2 城市安全韧性评估等级划分标准

指标	低度韧性(Ⅰ级)	较低韧性(Ⅱ级)	中度韧性(Ⅲ级)	较高韧性(Ⅳ级)	高度韧性(Ⅴ级)
x_{11}	(7, 9]	(5, 7]	(4, 5]	(2, 4]	(0, 2]
x_{12}	(0.5, 1]	(1, 2.5]	(2.5, 4]	(4, 6.5]	(6.5, 9]
x_{13}	(0, 10%]	(10%, 25%]	(25%, 40%]	(40%, 55%]	(55%, 70%]
x_{14}	(0, 20]	(20, 40]	(40, 60]	(60, 80]	(80, 100]
x_{15}	(10%, 15%]	(15%, 25%]	(25%, 35%]	(35%, 50%]	(50%, 70%]
x_{16}	(0, 2%]	(2%, 4%]	(4%, 6%]	(6%, 8%]	(8%, 10%]
x_{21}	[700, 1000]	[700, 500)	[350, 500)	[200, 350)	[100, 200)
x_{22}	(5%, 6%]	(4%, 5%]	(3%, 4%]	(2%, 3%]	[1%, 2%]
x_{23}	[10%, 25%]	(25%, 40%]	(40%, 55%]	(55%, 75%]	(75%, 95%]
x_{24}	[0, 5%]	(5%, 10%]	(10%, 15%]	(15%, 20%]	(20%, 25%]
x_{25}	(5%, 20%]	(20%, 35%]	(35%, 50%]	(50%, 65%]	(65%, 80%]
x_{26}	(0, 200]	(200, 450]	(450, 700]	(700, 950]	(950, 1200]
x_{27}	[1%, 2%]	(2%, 3%]	(3%, 4%]	(4%, 5%]	(5%, 6%]
x_{31}	(350, 450]	(250, 350]	(150, 250]	(100, 150]	(50, 100]
x_{32}	[1, 3]	(3, 5]	(5, 7]	(7, 9]	(9, 12]
x_{33}	[3, 6]	(6, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]
x_{34}	(10%, 15%]	(15%, 25%]	(25%, 45%]	(45%, 65%]	(65%, 95%]
x_{35}	(100, 250]	(250, 400]	(400, 550]	(550, 700]	(700, 850]
x_{36}	(0, 15]	(15, 30]	(30, 45]	(45, 60]	(60, 75]
x_{37}	(0, 3]	(3, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]
x_{41}	[15, 20]	(10, 15]	(5, 10]	(2.5, 5]	(0, 2.5]
x_{42}	[30%, 50%]	(50%, 65%]	(65%, 75%]	(75%, 85%]	(85%, 100%]
x_{43}	[20%, 45%]	(45%, 65%]	(65%, 75%]	(75%, 90%]	(95%, 100%]
x_{44}	(0, 20%]	(20%, 40%]	(40%, 60%]	(60%, 80%]	(80%, 100%]
x_{45}	[5%, 15%]	(15%, 25%]	(25%, 35%]	(35%, 45%]	(45%, 60%]
x_{46}	[3, 5]	(5, 10]	(10, 15]	(15, 20]	(20, 25]

表 3 城市安全韧性评估指标正态云特征值

指标	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
x_{11}	(8, 0.86, 0.01)	(6, 0.86, 0.01)	(4.5, 0.43, 0.01)	(3, 0.86, 0.01)	(1, 0.86, 0.01)
x_{12}	(0.75, 0.21, 0.01)	(1.75, 0.64, 0.01)	(3.25, 0.64, 0.01)	(5.25, 1.07, 0.01)	(7.75, 1.07, 0.01)
x_{13}	(0.05, 0.04, 0.01)	(0.175, 0.06, 0.01)	(0.325, 0.06, 0.01)	(0.475, 0.06, 0.01)	(0.625, 0.06, 0.01)
x_{14}	(10, 8.57, 0.01)	(30, 8.57, 0.01)	(50, 8.57, 0.01)	(70, 8.57, 0.01)	(90, 8.57, 0.01)
x_{15}	(0.125, 0.02, 0.01)	(0.2, 0.04, 0.01)	(0.3, 0.04, 0.01)	(0.425, 0.06, 0.01)	(0.6, 0.09, 0.01)
x_{16}	(0.01, 0.01, 0.01)	(0.03, 0.01, 0.01)	(0.05, 0.01, 0.01)	(0.07, 0.01, 0.01)	(0.09, 0.01, 0.01)
x_{21}	(850, 128.48, 0.01)	(600, 85.65, 0.01)	(425, 64.24, 0.01)	(275, 64.24, 0.01)	(150, 42.83, 0.01)
x_{22}	(0.055, 0.004, 0.01)	(0.045, 0.004, 0.01)	(0.035, 0.004, 0.01)	(0.025, 0.004, 0.01)	(0.015, 0.004, 0.01)
x_{23}	(0.175, 0.06, 0.01)	(0.325, 0.06, 0.01)	(0.475, 0.06, 0.01)	(0.65, 0.09, 0.01)	(0.85, 0.09, 0.01)
x_{24}	(0.025, 0.02, 0.01)	(0.075, 0.02, 0.01)	(0.125, 0.02, 0.01)	(0.175, 0.02, 0.01)	(0.225, 0.02, 0.01)
x_{25}	(0.125, 0.06, 0.01)	(0.275, 0.06, 0.01)	(0.425, 0.06, 0.01)	(0.575, 0.06, 0.01)	(0.725, 0.06, 0.01)
x_{26}	(100, 85.65, 0.01)	(325, 107.07, 0.01)	(575, 107.07, 0.01)	(825, 107.07, 0.01)	(1075, 107.07, 0.01)
x_{27}	(0.015, 0.004, 0.01)	(0.025, 0.004, 0.01)	(0.035, 0.004, 0.01)	(0.045, 0.004, 0.01)	(0.055, 0.004, 0.01)
x_{31}	(400, 42.83, 0.01)	(300, 42.83, 0.01)	(200, 42.83, 0.01)	(125, 21.41, 0.01)	(75, 21.41, 0.01)
x_{32}	(2, 0.86, 0.01)	(4, 0.86, 0.01)	(6, 0.86, 0.01)	(8, 0.86, 0.01)	(10.5, 1.28, 0.01)
x_{33}	(4.5, 1.28, 0.01)	(8, 1.71, 0.01)	(12.5, 2.14, 0.01)	(17.5, 2.14, 0.01)	(22.5, 2.14, 0.01)
x_{34}	(0.125, 0.02, 0.01)	(0.2, 0.04, 0.01)	(0.35, 0.09, 0.01)	(0.55, 0.09, 0.01)	(0.8, 0.13, 0.01)
x_{35}	(175, 64.24, 0.01)	(325, 64.24, 0.01)	(475, 64.24, 0.01)	(625, 64.24, 0.01)	(775, 64.24, 0.01)
x_{36}	(7.5, 6.42, 0.01)	(22.5, 6.42, 0.01)	(37.5, 6.42, 0.01)	(52.5, 6.42, 0.01)	(67.5, 6.42, 0.01)
x_{37}	(1.5, 1.28, 0.01)	(4, 0.86, 0.01)	(7.5, 2.14, 0.01)	(12.5, 2.14, 0.01)	(17.5, 2.14, 0.01)
x_{41}	(17.5, 2.14, 0.01)	(12.5, 2.14, 0.01)	(7.5, 2.14, 0.01)	(3.75, 1.07, 0.01)	(1.25, 1.07, 0.01)
x_{42}	(0.4, 0.09, 0.01)	(0.575, 0.06, 0.01)	(0.7, 0.04, 0.01)	(0.8, 0.04, 0.01)	(0.925, 0.06, 0.01)
x_{43}	(0.325, 0.11, 0.01)	(0.55, 0.09, 0.01)	(0.7, 0.04, 0.01)	(0.825, 0.06, 0.01)	(0.975, 0.02, 0.01)
x_{44}	(0.1, 0.09, 0.01)	(0.3, 0.09, 0.01)	(0.5, 0.09, 0.01)	(0.7, 0.09, 0.01)	(0.9, 0.09, 0.01)
x_{45}	(0.1, 0.04, 0.01)	(0.2, 0.04, 0.01)	(0.3, 0.04, 0.01)	(0.4, 0.04, 0.01)	(0.525, 0.06, 0.01)
x_{46}	(4, 0.9, 0.01)	(7.5, 2.14, 0.01)	(12.5, 2.14, 0.01)	(17.5, 2.14, 0.01)	(22.5, 2.14, 0.01)

3.2 韧性评估标准

城市是一个多维耦合动态系统,考虑到其受多层次影响,从城市现状特点及韧性内涵出发,结合相关文献中韧性等级划分标准,基于实地调研及专家评定,将城市安全韧性分为低度韧性(I级)、较低韧性(II级)、中度韧性(III级)、较高韧性(IV级)、高度韧性(V级)5个评估等级。在分析相关文献、专家意见的基础上,结合实地调研数据,并参照相关韧性界定标准,确定城市安全韧性评估等级划分标准(表2)。基于表2,根据式(3)、式(4)计算得出城市安全韧性评估指标正态云特征值(Ex 、 En 、 He),如表3所示。其中 He 根据试验取得,本文取0.01。根据表3中各指标对应等级的正态云特征值,通过MATLAB编程计算,得出各评估指标的正态云图,由于篇幅限制,以安全应急资源与设施占比和城镇登记失业率的正态云图为例(图3、图4)。

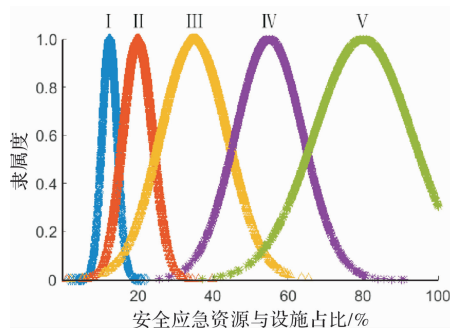


图3 安全应急资源与设施占比正态云图

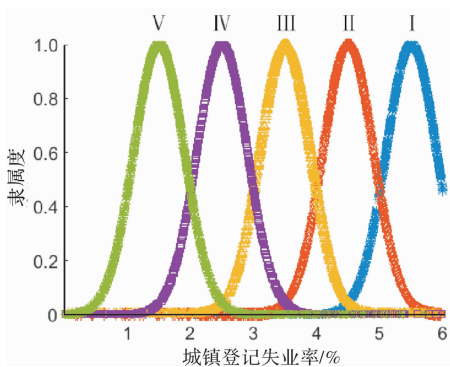


图4 城镇登记失业率正态云图

安全应急资源与设施占比 x_{34} 为正向指标,具备一定的吸收适应能力,即应急资源与设施占比越大,能快速吸收外界的扰动与冲击,维持城市系统安全与关键功能正常运转,根据韧性等级划分标准,指标 $x_{34} \in (65\%, 95\%]$ 为高度韧性,因此在云图中,高度韧性等级被接受的范围较大,云滴出现在该段的概率就越大。

指标城镇登记失业率为负向指标 x_{21} ,对城市社会安全韧性产生负向效应,即失业率越高韧性相对较低,因此,韧性等级在正态云图中反向排序。

4 案例分析

4.1 西安市韧性评估

选取陕西省西安市作为研究对象,验证模型

有效性。定量指标参考并利用《中国城市统计年鉴》、《西安统计年鉴》与西安市统计公报等相关数据^[16-18];定性指标采取向行业专家、高校相关专业老师、城市安全相关管理部门与组织人员等发放问卷和详细访谈的方式评定。

将统计年鉴与调研过程中采集的指标数据输入正向云发生器,计算各指标对应韧性等级下的隶属度,形成隶属度矩阵,利用公式(6)将指标权重与隶属度矩阵进行模糊关系转换,得到各指标对应城市安全韧性评估等级下的综合隶属度,依据最大隶属度原则,得出各准则层及子准则层的安全韧性评估等级(表4、表5)。

表4 城市安全韧性抗动力、吸收/适应力、恢复力等级评估

准则层	子准则层	I	II	III	IV	V	韧性等级
经济韧性	抗动力	0	0.012	0.046	0.009	0	III
	吸收/适应力	0	0.020	0.060	0.035	0	III
	恢复力	0.025	0.062	0.012	0.039	0.003	II
社会韧性	抗动力	0.020	0.002	0.019	0.001	0	I
	吸收/适应力	0.019	0.006	0.043	0.002	0.025	III
	恢复力	0.011	0.021	0.001	0.041	0.005	IV
基础设施韧性	抗动力	0	0.001	0.026	0	0	III
	吸收/适应力	0	0	0.002	0.100	0.029	IV
	恢复力	0	0.015	0.049	0.050	0.012	IV
生态环境韧性	抗动力	0	0	0.001	0.011	0.015	V
	吸收/适应力	0	0	0.014	0.038	0.058	V
	恢复力	0	0.006	0.033	0.032	0	III

表5 城市安全韧性综合评估结果

	I	II	III	IV	V	韧性等级
经济韧性	0.009	0.034	0.041	0.001	0.001	III
社会韧性	0.017	0.009	0.025	0.013	0.013	III
基础设施韧性	0.000	0.007	0.026	0.064	0.018	IV
生态环境韧性	0.000	0.002	0.018	0.031	0.029	IV
综合韧性	0.006	0.013	0.028	0.030	0.015	IV

4.2 韧性评价结果及分析

4.2.1 城市安全韧性指标权重分析

由表1各评估指标权重值可知,城市安全科技创新应用能力(0.072)、城市安全建设维护支出(0.061)、生活垃圾无害化处理率(0.059)、第三产业占GDP比重(0.055)所占比重较大,表明这4项指标是影响城市安全韧性的主要因素,且各指标均为正向指标,其值越大,城市安全韧性状况越好;人口密度(0.021)、城镇登记失业率(0.019)、每万人拥有公共汽车量(0.018)所占比重较小,对城市安全韧性产生的影响相对较小,其中人口密度、城镇登记失业率为负向指标,其值越大,城市安全韧性状态越差。

4.2.2 抗动力、吸收/适应力、恢复力韧性评估结果分析

“抗动力”是指人类社会经济活动对城市及各类系统的直接扰动因素,反映人类活动对城市系统造成的负荷。从表4可知,西安市经济和基础设施抗动力处于III级,即中等韧性水平,通过降低扰动,增强城市系统抵抗力;社会抗动力处于I级韧性水平,表明社会系统的抗扰动能力较弱;生态环境抗动力处于V级,表明生态系统不易遭到外界的破坏。

“吸收/适应力”是指城市系统具备吸收外界干扰和破坏的能力,并能持续适应各种不确定性的影响,维持各系统安全运行。从表4可知,经济和社会吸收/适应力处于Ⅲ级,通过经济多样化和社会保障能力等方式提升吸收/适应力;基础设施和生态环境吸收/适应力分别处于较高韧性和高度韧性水平,表明基础设施与生态环境能及时吸收并适应外界的变化。

“恢复力”是指城市安全遭到破坏时,通过自我调整、学习并总结经验,降低损失,使系统能快速恢复至初始状态甚至更高韧性水平。从表4可知,经济恢复力处于Ⅱ级,表明经济系统在遭到干扰后,需经过长时间的缓冲与积累逐渐恢复;社会 and 基础设施恢复力处于Ⅳ级,即较高韧性,社会和基础设施面对扰动能够做出快速反应;生态环境恢复力处于中等韧性,通过采取适当的改善措施使恢复力水平达到较高韧性状态。

4.2.3 城市韧性评估等级分析

由表5可知,城市安全韧性综合评估等级由高到低的隶属度分别为0.030、0.028、0.015、0.013、0.006,根据最大隶属度原则,西安市城市安全韧性等级属于Ⅳ级,即较高韧性水平。根据准则层隶属度,西安市基础设施和生态环境安全韧性水平优于经济和社会安全韧性,主要原因在于经济和社会层面的安全韧性提升需经过长时间的积累才能表现出明显的效果,属于对城市整体经济水平和社会安全保障能力的提升;基础设施和生态环境安全韧性则可以通过制定详细计划、采取具体措施在短期内实现提升。因此,在不断完善基础设施与生态环境安全韧性建设的同时,全面加强经济与社会安全韧性的提升。

5 城市韧性建设重点及提升策略

依据西安市韧性评估等级结果,为城市韧性建设提出以下建议。

(1)构建城市经济韧性结构体系,适时调整产业结构,增加高新技术产业投资与创新发展,借助信息资源与技术力量开创高端产业,推进产业间的融合发展,提升经济韧性度。

(2)不断完善社会保障体制,加强公共安全与公共组织管理,建立社会韧性评价系统,积极发挥高等教育作用,合理有效地开发并利用社会资源,确保民生与就业,切实改善社会韧性度。

(3)将基础设施发展纳入城市韧性建设与规划中,加强基础设施坚固性与安全性的同时还需具备适当的冗余性,提升基础设施抵御外界扰动的能力,全面增强基础设施韧性度。

(4)高度重视生态环境产生的影响与效应,加强生态环境系统管理,将生态环境纳入可持续发展战略与规划建设中,积极促进生态环境韧性度提升。

综合城市实际状况、表现特征及具体发展需求,构建科学合理的城市安全韧性评价体系,评估城市当前安全韧性状态、未来发展趋势及实施效果,制定切实可行的计划与策略,全方位提升城市整体韧性度。

6 结论

(1)为解决城市安全韧性建设过程中存在的模糊性问题,综合考虑安全韧性的扰动力、吸收/适应力和恢复力特征,基于经济、社会、基础设施和生态环境等4个维度构建城市安全韧性评估指标体系。

(2)构建基于熵权-正态云的城市安全韧性评估模型,划分韧性评估等级,评估西安市安全韧性等级。结果表明,基础设施和生态环境韧性优于经济和社会韧性,且西安市综合安全韧性处于较高水平,评估结果与实际状态相符度较高。

(3)评估过程将城市安全韧性指标量化处理,能清晰得到各指标对城市安全韧性的影响程度并明确韧性建设过程中存在的薄弱环节,便于制定合理的计划、采取针对性的措施,切实提高城市安全韧性度。

参考文献:

- [1] 陈奕玮,丁关良.中国地级市城市经济韧性的测度[J].统计与决策,2020,36(21):102-106.
- [2] 唐明凤,吴亚芳.基于创新生态系统视角的韧性社区建设与治理研究[J].湖南社会科学,2021(1):96-103.
- [3] 吕彪,高自强,管心怡,等.基于日变交通配流的城市道路网络韧性评估[J].西南交通大学学报,2020,55(6):1181-1190.
- [4] 李葛,齐晋荣,李寻昌,等.基于PSR层次分析模型-BP神经网络的城市安全评价[J].灾害学,2020,35(3):224-229.
- [5] 陈为公,张娜,张友森,等.基于DEMATEL-ISM的城市灾害韧性影响因素研究[J].灾害学,2021,36(1):1-6,17.
- [6] ALEXANDER D E. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey[J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2013, 13(11): 2707-2716.
- [7] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 1973(4): 1-23.
- [8] 李彤玥,牛品一,顾朝林.弹性城市研究框架综述[J].城市规划学刊,2014(5):23-31.
- [9] 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.
- [10] 方东平,李在上,李楠,等.城市韧性-基于“三度空间下系统的系统”的思考[J].土木工程学报,2017,50(7):1-7.
- [11] 王萍,闫丽莉,郭文超.基于AHP-熵权法的基层地震科普能力评价[J].中国安全生产科学技术,2020,16(12):170-175.
- [12] 杨洁,王国胤,刘群,等.正态云模型研究回顾与展望[J].计算机学报,2018,41(3):724-744.
- [13] 陈燕丽,杨语晨,杜栋.基于云模型的省域生态环境绩效评价研究[J].软科学,2018,32(1):100-103,108.
- [14] 李慧民,钟兴举,田卫.基于NCM的旧工业建筑再生脆弱性分析[J].安全与环境学报,2020,20(4):1221-1228.
- [15] 龚艳冰,巢妍.基于正态云线性回归模型的企业员工绩效评价[J].统计与决策,2020,36(18):167-170.
- [16] 国家统计局.中国城市统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2011-2020.
- [17] 西安市统计局.西安统计年鉴[M].西安:中国统计出版社,2011-2020.
- [18] 西安市统计局.统计公报(2011-2020)[EB/OL]. [2021-03-08]. <http://tjj.xa.gov.cn/tjsj/tjgb/1.html>.

Study on Urban Safety Resilience Assessment Based on Entropy Weight-Normal Cloud Model

GUO Yuyu¹, LUO Fuzhou¹ and ZHONG Xingrun²

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to improve the construction of urban safety resilience, the evaluation index system is established from four dimensions, including economy resilience, society resilience, infrastructure resilience and ecological environment resilience, considering the connotation of urban safety resilience and the characteristics of disturbance force, absorption/adaptability and resilience. Then the weight of each index is calculated by entropy weight method, and the evaluation grade criteria are divided. The comprehensive evaluation model of urban safety resilience is established by normal cloud model. Finally, the validity of the model is verified by taking Xi'an in Shaanxi Province as an example. The results show that infrastructure resilience and ecological environment resilience are better than that of economy resilience and society resilience. And that the comprehensive safety resilience level of Xi'an is calculated IV by the model, which is higher resilience.

Key words: resilience; urban safety resilience; safety resilience evaluation; entropy weight-normal cloud model; Xi'an

(上接第 167 页)

Spatial-temporal Patterns and Influencing Factor Contributions of Casualties from Global Land Destructive Earthquakes in the World(1970—2019)

HU Xiaokang^{1,2} and SHI Peijun^{1,2,3}

(1. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management & Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. Academy of Plateau Science and Sustainability, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Based on regional disaster system theory, we comb the global land destructive earthquake disaster data from 1970 to 2019, and calculate the contributions of earthquake disaster causing factors, which are hazard (epicenter intensity), exposures (population density, per capita GDP) and environments (elevation, relative elevation, slope), on casualties by using the geographical detectors model. The results show that: (1) from 1970 to 2019, the frequency of destructive earthquake disasters in the world fluctuated and increased, and the casualties caused by earthquake catastrophe showed an increasing trend. In the past 20 years, the number of casualties of earthquake disasters below M7.0 showed a downward trend. (2) About 60% of the global land destructive earthquake disasters are distributed in the Mediterranean Himalayan seismic belt and about 35% in the circum-pacific seismic belt. (3) The most important contribution rate to the earthquake is the damage of buildings, followed by the epicenter intensity and population density. Among elevation, relative elevation and slope, relative elevation has the largest contribution to the casualties. (4) The contribution rate of the influence factors on the casualties is different between the circum-pacific seismic belt and the Mediterranean Himalayan seismic belt.

Key words: earthquake; regional disaster system theory; global land earthquakes; casualties; spatial-temporal patterns; disaster-formative environment; contribution rate