

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.
[ZHANG Jingyan, FAN Le, ZHANG Zewei, et al. Research and Practice on Safety Resilience Impact Assessment Technology for Metropolitan Cities under Multi-disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 7-12. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.002.]

多灾种下特大城市安全韧性影响评估研究与实践^{*}

张靖岩^{1,2}, 范乐¹, 张泽伟¹, 于文^{1,2}, 朱立新^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 住房和城乡建设部防灾研究中心, 北京 100013)

摘要: 针对灾害发生发展全过程中对城市的功能影响缺乏有效的评价方法和体系, 以及对于城市综合灾害防御和防灾韧性城市建设的指导存在不足, 研究运用层次分析法, 提出了基于模糊评价的数学模型, 建立了多层次指标的权重向量和判断矩阵, 实现了多层次、多因素的评估需求。研究根据城市安全韧性影响的评估指标体系, 实现了评估指标的层级架构并计算其权重。运用相关研究成果针对某特大城市开展案例研究, 并针对其薄弱环节提出提升措施和优化建议。

关键词: 多灾种; 城市安全; 韧性评估

中图分类号: X43; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)01-0007-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.01.002

近年来, 中国城市高速化发展, 使城市人口以及城市资产高速拢合, 令大量城市在各种灾害面前更加暴露脆弱, 也使传统的灾害防范应对体系急需完善。尤其当多灾种造成不同领域与部门的灾害时, 更加让城市管理者难以应付, 过去的局部性危害, 也因致灾因子的同时影响效应, 变成了系统性循环危害。面对严峻且复杂的城市灾害风险, 城市安全韧性已成为社会经济正常运行和可持续发展的重要基础。

城市韧性(Urban resilience)是指城市系统能够准备和响应扰动, 从中恢复并使其对公共安全和经济活动的影响降至最低的能力^[1]。至今, 城市韧性已经作为一个多学科合作的领域, 吸引了诸多国内外不同领域的专家、学者甚至组织参与讨论和研究, 在韧性城市理论、社区韧性评估、城市组织韧性评估、城市基础设施韧性评估及各灾种下城市韧性评估等方面多有研究进展。在韧性城市理论方面, 美国洛克菲勒基金会提出的 CRF/CRI 体系, 是目前得到广泛应用的韧性城市框架理论体系^[2]; 日本法政大学也对韧性城市评价指标体系进行探索, 针对性的对城市系统气候变化和自然灾害进行韧性评定^[3]。在社区韧性评估方面, CUTTER^[4]认为社区韧性是减少灾害损失的有效机制; 方东平基于对北京发生的多次重大地震灾害梳理, 提出了具有可操作的社区地震韧性定量评价方法^[5]。在城市组织韧性评估方面, 魏冶等提出一种基于演化韧性的城市网络韧性概念以及相应的综合分析框架^[6]; 在城市基础设施韧性评估

方面, 栾博则基于绿色基础设施围绕韧性设计展开探讨, 并提出相应的韧性作用框架^[7]; 周诗伟等构建了基础设施的韧性评估模型^[8]。

其中, 在城市韧性的研究中针对各灾种下城市韧性评估的研究体系仍不完善, 唐皇凤等从韧性城市理论角度出发, 结合基础设施、组织制度、城市经济和城市社会这四个层面, 系统性梳理了我国现代城市公共安全治理的基本路径与关键举措^[9]; 张家玉等依托三度空间理念, 建立了城市韧性评价体系, 并利用 CRITIC-熵权及 TOPSIS 方法构建了城市韧性的评价模型^[10]; 马奔等以 D 市为例, 研究了城市安全发展和韧性治理的差别^[11]; 刘严萍等人从交互度、敏感性、应对力、成长度四个层次, 构建城市韧性评价指标体系^[12]; 孙亚南等研究得出江苏各地市的韧性空间关联特征^[13]; 王燕语等提出了多灾害下城市安全韧性评价指标体系^[14]。以上研究都从相应的研究视角提出了对应的评估框架体系, 但针对多灾种下城市韧性影响评估的理论体系较为稀少, 对多灾种下特大城市安全韧性影响评估方法和数学模型的研究仍有欠缺, 相关研究仍处于空白领域。本文结合先行研究, 根据相应的安全韧性影响评估体系, 创建了多灾种下城市安全韧性影响的评估方法和数学模型, 并以某特大城市为例开展应用实践研究, 为城市多灾种下防灾减灾的需求提供决策支持, 为安全韧性城市构建理论研究及相关标准制定提供技术支撑。

* 收稿日期: 2022-08-08

修回日期: 2022-11-18

基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目(2021-K-019)

第一作者简介: 张靖岩(1978-), 男, 汉族, 黑龙江五常人, 博士, 研究员, 主要从事防灾减灾、城市韧性、建筑防火等方面的研究。E-mail: cabrzjy@163.com

1 多灾种下特大城市安全韧性影响评估方法及模型

多灾种下特大城市安全韧性影响评估指标体

表 1 多灾种下特大城市安全韧性影响评估指标

一级	二级	三级	量化方法
灾害易发性与危险性特征	台风易发性与危险性	历史台风频次	次
		历史台风过程降雨量	mm
		历史台风风速	m/s
	暴雨易发性与危险性	历史暴雨频次	次
		历史平均暴雨强度	mm/h
		历史持续时间	h
		历史过程降雨量	mm
	地震易发性与危险性	河网密度	河流长度/研究区面积/(km/km ²)
		历史地震频次	次
		历史地震级数	级
		区域抗震设防烈度	度
		历史震源深度	km
		历史震中距	km
	火灾易发性与危险性	历史火灾频次	建筑易燃等级
		易发区域建筑密度	建筑基底面积/区域面积/%
		历史风速	m/s
经济社会	经济结构	个体和社会储蓄规模	平均储蓄量/万元
		收入水平	平均收入/万元
		物价水平	居民消费价格指数(CPI)
	社会结构	人口构成	各年龄段人口数量占比/%
		工作人口的年龄结构	工作人口年龄段占比/%
	文化治安	以往灾害恢复的经验	是否具备灾害恢复经验(是/否)
		犯罪率与执法效率	%
	土地使用	开发强度	建设用地面积占地比例/%
		蓝绿空间结构	蓝绿空间占比/%
		规划合理性与建筑密度	布局现状合理性和建筑密度/%
		不透水地面的比例	不透水地面面积/区域总面积/%
	建筑	不利工程地段条件下建筑物数量与分布情况	建筑数量/栋
		不符合现行建筑规范和标准的建筑物比例	百分比/%
		建筑高度分布、比例	超高层、高层、多层建筑比例/%
		建筑结构分布、比例	分布现状及比例/%
交通设施	交通设施	易燃区域辐射范围内建筑物数量	栋
		路网密度	人均道路面积/(km/km ²)
		城市老旧桥梁比例	投入使用时间超过设计设计使用年限 50% 的桥梁比例/%
	交通设施	城际物资运送通道密度	紧急情况下,作为城市级别物资运送的道路密度/(km/km ²)
		防灾分区内救援通道比例	紧急情况下各防灾分区救援通道数量/防灾分区道路总数/%
易淹没路段比例	易淹没路段比例	防灾分区人均疏散线路数量	疏散道路长度/防灾分区疏散人数(10 万人)
		易淹没路段比例	%

系是基于城市安全韧性三角形模型^[15]建立的三级指标体系(表 1)。其中四个一级指标,囊括了城市承灾体的自然、社会学与工程属性。对二级指标在不同韧性特征的架构下进行归类和拓展,并通过三级指标提出可量化的关联特征。

续表 1

基础设施 与建筑	供应设施	备用天然气供应维持基本服务的天数	常住人口使用天数/d
		备用热能供应维持基本服务的天数	常住人口使用天数/d
		户年均停电时间	因维护、调峰、突发事件等导致的户年均停电时间/h
		户年均停水时间	因维护、突发时间等导致的户年均停水时间/d
		排水网络能力	当地降雨量和排水网络的设计流量水平/mm
		城区公共区域监控覆盖率百分比	(可监控面积/公共区域总面积)/%
	应急保障设施	移动电话与高速宽带家庭普及率	移动电话用户数(万户)/城市常住人口数(万人)×100% 接入高速宽带的家庭数(万户)/城市常住人口家庭数(万户)×100%
		基础设施智慧化水平	可实时监控运行数据基础设施的比例/%
		避难场地条件	应急避难场地是否处于危险地段或临近次生灾害源，是否在建筑倒塌或高空坠落范围内
		人均避难场所面积	(城市应急避难场所面积/城市常住人口数)/(m ² /人)
应急响应机制	应急管理	避难空间服务半径覆盖率	可覆盖人口占全市人口比例/%
		避难场所可达性	指示标志系统完备并应符合相关规定
		应急物资储备情况	根据居住区应急疏散人数和避难时间，在区域内存储一定关键物资
		灾害救援设施区位及覆盖能力	面积/m ²
		应急物资储备量及覆盖能力	覆盖面积/m ² 和使用天数/d
		每千人医疗机构床位数	(床位数/常住人口数)/(张/千人)
		医疗急救设施区位及覆盖能力	面积/m ²
		应急人员	灾害风险地图
	应急训练频率		次
		应急管理	灾害风险普查频率
应急预案完整性			包括完整具体措施的应急预案(是/否)
应急人员		应急人员配比	(应急人员数量/人口总数)/(人/千人)
		救援队伍建设情况	居住区与专业救援队伍的沟通性，开展救援工作的时效性
		应急人员专业能力	具备专业应急能力人员数量/人

多灾种下特大城市安全韧性影响评估体系在不确定系统的范畴之内,因涉政治、文化等非量化资料在城市安全韧性评价体系架构中有涉及,故在研究方法上选用模糊集合理论,并构建多层次的模糊综合评价模型。

设模糊评价矩阵为 \mathbf{R} , 权重向量为 \mathbf{A} , 综合评价结果为 \mathbf{B} ; 则:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (1)$$

(1) 单层次模糊评价。设因素集合表示为 $\mathbf{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$, 评价指标的评价集表示为 $\mathbf{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 。对 $f_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 进行单因素评价, 确定评价事物对评价等价 $v_j (j = 1, 2, \dots, m)$ 的隶属度 r_{ij} , 得出:

$$r_{ij} = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}) \quad (2)$$

构建得出评价矩阵 \mathbf{R} :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R} = (b_1, b_2, \dots, b_m) = (a_1, a_2, \dots, a_m) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中 $b_j = V_{i=1}^n (a_i \wedge r_{ij}), (j = 1, 2, \dots, m)$ 。

运算法则由模糊评价模型的评价目的决定, 最后需要将 \mathbf{b} , 进行归一化处理。

(2) 多层次的模糊综合评价按照以下步骤进行。

① 将因素集合 \mathbf{F} 按照属性划分为 \mathbf{M} , 若 \mathbf{M} 将 \mathbf{F} 分成 n 个子集, 且满足以下条件:

$\sum_{i=1}^n f_i = F, f_i \cap f_j = \emptyset (i \neq j)$ 则称 M 为对 F 集合的一个划分。即: $F|M = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 。而 f_i 包含有 k_i 个因素, 即 $f_i = \{f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}\}$ 。故共有 $\sum_{i=1}^n k_i$ 个因素 $\sum_{i=1}^n f_i = F, f_i \cap f_j = \emptyset (i \neq j)$ 。

②对 f_i 的 k_i 个因素, 依照以上模型进行处理, 有: $B_i = A_i \cdot R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{im}), i = 1, 2, \dots, n$ 。其中 R_i 为 f_i 的总的评价矩阵, A_i 为 f_i 的各因素权重的权向量。

③把上一步所得到的每类所做的综合评价结果 B , 作为行向量 R , 即: $R = (B_1, B_2, \dots, B_n)^T$ 。 R 为总的评价矩阵, 设 $F|M$ 的权重为 A , 则可以得到 $F|M$ 的综合评价向量: $B = A \cdot R$ 。

方法 1:

$$b_j = \max[(a_1 \cdot r_{1j}), (a_2 \cdot r_{2j}), \dots, (a_n \cdot r_{nj})], j = 1, 2, \dots, m; \quad (5)$$

方法 2:

$$b_j = \min[1, \sum_{i=1}^n \min(a_i \cdot r_{ij})]。 \quad (6)$$

2 指标权重的确定

本文中模糊子集 A 利用 AHP 层次分析法等确定各个级别指标的权重, 下面我们详细给出模糊子集 A 的确定方法和计算步骤。

(1) 建立判断矩阵。假设评估体系架构的目标层是 P , 因子层是 a , 则建立矩阵如下:

$$P = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}。 \quad (7)$$

式中: a_{ij} 表示 A_i 相对于 A_j 的重要程度的标度。两个因子之间的标度采用九级标度法。

(2) 计算权重。计算 A 中每行因子的乘积 M_i :

$$M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}, i = 1, 2, \dots, n。 \quad (8)$$

计算 M_i 的 n 次方根 W'_i :

$$W'_i = \sqrt[n]{M_i}, i = 1, 2, \dots, n。 \quad (9)$$

将向量 $W' = [W'_1, W'_2, \dots, W'_n]$ 归一化:

$$W_i = W'_i / \sum_{i=1}^n W'_i。 \quad (10)$$

令 $W' = [W'_1, W'_2, \dots, W'_n]$ 即为特征向量, 各元素 W_i 即为各指标因子的权重。

(3) 检验一致性。先运用公式 (11), 得最大特征根 λ_{\max} 。后运用公式 (12), 得一致性指标 CI 。最后通过公式 (13) 计算一致性比率 CR 检验, 当 $CR < 0.1$ 时, 一致性为可接受; 当 $CR \geq 0.1$ 时, 当作适当修正。计算公式如下:

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(PW)_i}{nW_{i \max}}; \quad (11)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max}}{n-1}; \quad (12)$$

$$CR = CI/RI。 \quad (13)$$

式中: n 表示矩阵阶数。 RI 表示平均随机一致性指数, 其取值见表 2。

3 实例分析

以某特大城市为例进行安全韧性影响评估分析。该城市是我国北方的港口城市, 在设施、人口、社会经济、产业结构等方面具有我国特大城市的典型特征, 易发生暴雨、洪涝等多发性灾害, 适合本研究进行实例分析。实践区域总面积约 367.5 km², 南北距离约 17.5 km 里, 东西距离约 21 km, 包含了建筑、道路、生命线、供水、供电、通信、港口等城市核心建设设施。

3.1 确定韧性影响评估指标权重

根据影响评估指标分类, 邀请从事城市灾害研究、城市经济社会研究、城市基础设施研究、应急风险管理研究等领域从业经验超过 10 年且具备正高级职称的十位专家在相互无交流的状态下打分得到两两比较判断矩阵。通过对专家评价结果进行综合和加权平均处理, 基于 AHP 的多灾种下特大城市安全韧性影响评估指标调查表中, 最终确定各指标权重(表 3)。

表 2 RI 随机一致性指标的取值表

评判矩阵阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

表 3 多灾种下特大城市安全韧性影响评估指标权重

一级指标	平均权重	二级指标	平均权重	相对权重	三级指标	平均权重	相对权重
灾害易发性与危险性特征 E1	0.110 8	台风易发性与危险性 F1	0.046 6	0.005 2	历史台风频次 G1	0.260 0	0.001 3
					历史台风过程降雨量 G2	0.578 9	0.003 0
					历史台风风速 G3	0.161 2	0.000 8
					历史暴雨频次 G4	0.252 9	0.008 5
		暴雨易发性与危险性 F2	0.302 1	0.033 5	历史平均暴雨强度 G5	0.419 9	0.014 0
					历史持续时间 G6	0.090 0	0.003 0
					历史过程降雨量 G7	0.151 1	0.005 1
					河网密度 G8	0.086 3	0.002 9
					历史风速 G16	0.145 9	0.006 9
				
				
				
					应急响应机制 E4	0.209 5	0.016 1
		应急人员 F14	0.265 0	0.055 5	救援队伍建设情况 G61	0.520 7	0.028 9
					应急人员专业能力 G62	0.190 0	0.010 5

3.2 安全韧性影响模糊综合评价

3.2.1 确定评价集与隶属度矩阵

本案例中采用 5 种级别的评价集 $V = \{\text{很高, 较高, 中等, 较低, 很低}\}$ 。

第一类: $[80, 100]$, 很高;

第二类: $[70, 80)$, 较高;

第三类: $[50, 70)$, 中等;

第四类: $[30, 50)$, 较低;

第五类: $[10, 30)$, 很低。

本文对该城市进行多灾种下特大城市安全韧性影响评估时, 由 10 位专家针对三级指标评分, 并确定不同指标在各等级状态下的权重系数, 得出其模糊评价矩阵。最后得到三级指标的专家打分汇总表(表 4)。

表 4 三级指标的专家打分汇总表

三级指标	很高	较高	中等	较低	很低
G1	0.0	0.7	0.3	0.0	0.0
G2	0.1	0.3	0.6	0.0	0.0
G3	0.0	0.8	0.2	0.0	0.0
...
G61	0.1	0.5	0.4	0.0	0.0
G62	0.2	0.4	0.4	0.0	0.0

由表 4 可得, 灾害易发性与危险性特征指标 E1 的隶属度矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

其他同理。

再运用 Matlab 软件, 通过加权平均算法可得到各级指标的综合评价结果。

根据 10 位专家对历史台风频次 G1、历史台风过程降雨量 G2 和历史台风风速 G3 的打分情况, 按照前面所述的评价集, 得到评价矩阵:

$$B = A \cdot R = (0.260, 0.579, 0.161) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0.7 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.3 & 0.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0.8 & 0.2 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

根据 Matlab 运算, 可得到 $B = (0.058, 0.485, 0.458, 0, 0)$ 。对其进行归一化处理得:

$$B = (0.058, 0.485, 0.458, 0, 0). \quad (16)$$

其他同理。

可得多灾种下城市安全韧性影响总体评估:

$$B = A \cdot R = (0.111, 0.067, 0.613, 0.210) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 0.105 & 0.380 & 0.495 & 0.021 & 0 \\ 0.139 & 0.353 & 0.509 & 0 & 0 \\ 0.143 & 0.446 & 0.386 & 0.025 & 0 \\ 0.035 & 0.438 & 0.527 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

$$\text{可得 } B = (0.152, 0.443, 0.388, 0.018, 0).$$

3.2.2 模糊综合评价结果及分析

各级指标模糊矩阵的合成运算结果汇总(表 5 - 表 7)。

表 5 某城市的模糊综合评价结果

	很高	较高	中等	较低	很低
	0.152	0.443	0.388	0.018	0

表 6 一级指标的模糊综合评价结果

一级指标	很高	较高	中等	较低	很低
E1	0.178	0.444	0.348	0.030	0
E2	0.126	0.471	0.403	0	0
E3	0.175	0.434	0.368	0.023	0
E4	0.080	0.458	0.463	0	0

表 7 二级指标的模糊综合评价结果

二级指标	很高	较高	中等	较低	很低
F1	0.058	0.485	0.458	0	0
F2	0.042	0.275	0.613	0.071	0
F3	0.019	0.556	0.386	0.039	0
...
F13	0.065	0.450	0.485	0	0
F14	0.119	0.481	0.400	0	0

根据前文设立的评价集, 针对模糊综合评价结果作定量化手段解决问题, 选择使用百分制记录分值的方法, 将评价集分成 5 种级别的评价结论, 因此 $m=5$ 。可得出 $v_1=100$; $v_2=80$; $v_3=60$; $v_4=40$; $v_5=20$ 。所以分数集 $V = (100, 80, 60, 40, 20)^T$, 可以记作韧性程度很高 $[80, 100)$, 韧性程度较高 $[60, 80)$, 韧性程度中等 $[40, 60)$, 韧性程度较低 $[20, 40)$, 韧性程度很低 $[0, 20)$ 。通过式(3), 得出:

$$\bar{S} = \frac{S_{\text{上限}} + S_{\text{中间}} + S_{\text{下限}}}{3} = 64.291 \in [60, 80)。$$

因此某城市安全韧性总体影响程度较高。其他指标同理。

根据多灾种下某城市安全韧性影响的模糊综合评价最终结果汇总(表 8), 最后对二级指标的评价结果进行排序(图 1)。

表 8 多灾种下某城市安全韧性影响的模糊综合评价最终结果汇总

评价目标	评价结果	一级指标	评价结果	二级指标	评价结果
某城市多灾种下安全韧性影响	64.291 3	灾害易发性与危险性特征 E1	65.131	台风易发性与危险性 F1	61.694
				暴雨易发性与危险性 F2	55.443
				地震易发性与危险性 F3	60.775
				火灾易发性与危险性 F4	74.622
		社会经济 E2	64.148	经济结构 F5	60.730
				社会结构 F6	69.026
				文化治安 F7	68.060
				土地使用和城市设计 F8	70.256
		建筑与基础设施 E3	64.920	建筑 F9	62.760
				交通设施 F10	64.392
				供应设施 F11	69.849
				应急保障设施 F12	67.323
		应急响应机制 E4	62.029	应急管理 F13	61.291
				应急人员 F14	64.086

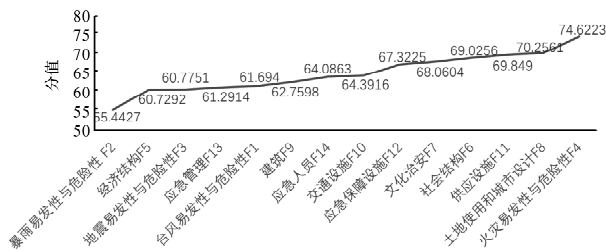


图1 二级指标评价结果排序

针对模糊综合评价结果的具体分析如下:

(1)根据表8分析可知多灾种下某城市安全韧性程度较高,其中评价结果 $E1 > E3 > E2 > E4$ 。

(2)灾害易发性与危险性特征65.131,其中火灾易发性与危险性的韧性程度最高,但暴雨易发性与危险性指标分数最低。

(3)建筑与基础设施64.920,其中土地使用和城市设计的韧性程度最高,但建筑指标分数最低。

(4)社会经济64.148,其中社会结构韧性程度最高,但经济结构指标分数最低。

(5)根据图1分析可知,暴雨易发性与危险性的韧性程度中等,属于总体分数最低的指标,在未来某城市安全韧性提升中应加强暴雨的监控和应对措施,完善灾害风险地图和应急预案,提高灾害风险普查频率和应急训练频率。

4 结论

(1)使用层次分析法将定性分析及定量分析联系起来,提出了多灾种下的特大城市安全韧性影响的模糊评价模型,使用层次分级法对指标体系进行优化并计算指标权重。

(2)基于多灾种下城市安全韧性影响评估方法,基于某城市进行安全韧性影响评估。在各层级评估指标的甄选与层级架构中,依据模糊评价模

型和方法,制定评估指标权重,运算并合成模糊综合评价结果,从而提出了针对性的优化对策。通过实践应用,提高了技术的适用性,分析多灾种下城市各系统的空间安全韧性,深化综合韧性评估,提高了技术的实用性。并对后续的标准制定以及软件开发提供了有力的技术支撑。

参考文献:

- [1] 李瑞奇,黄弘,周睿. 基于韧性曲线的城市安全韧性建模[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2020, 60(1): 1-8.
- [2] 徐耀阳,李刚,崔胜辉,等. 韧性科学的回顾与展望:从生态理论到城市实践[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5297-5304.
- [3] 邵亦文,徐江. 城市规划中实现韧性构建:日本强化规划对中国的启示[J]. 城市与减灾, 2017(4): 71-76.
- [4] CUTTER S L. A place-based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008, 18(4): 598-606.
- [5] 方东平,李全旺,李楠,等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 28-44.
- [6] 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.
- [7] 栾博,丁戎,王鑫,等. 城市绿色基础设施韧性设计范式转型探索[J]. 景观设计学, 2020, 8(6): 94-105.
- [8] 周诗伟,黄弘,李瑞奇. 城市基础设施韧性评估与敏感性分析[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(3): 189-195.
- [9] 唐皇凤,王豪. 可控的韧性治理:新时代基层治理现代化的模式选择[J]. 探索与争鸣, 2019(12): 53-62, 158.
- [10] 张家玉,杨晓冬. 三度空间理念下城市韧性评价与提升策略研究[J]. 工程管理学报, 2021, 35(6): 55-60.
- [11] 马奔,刘杰. 韧性理念如何融入城市治理:基于D市安全发展示范城市创建的启示[J]. 行政论坛, 2020, 27(5): 95-101.
- [12] 刘严萍,王慧飞,钱洪伟,等. 城市韧性:内涵与评价体系研究[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 8-12.
- [13] 孙亚南,尤晓彤. 城市韧性的水平测度及其时空演化规律:以江苏省为例[J]. 南京社会科学, 2021(7): 31-40, 48.
- [14] 王燕语,范圣权,范乐. 基于多因素、多层次评判的多灾种下城市安全韧性评价指标研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(1): 82-88.
- [15] 范维澄,刘奕,翁文国. 公共安全科技的“三角形”框架与“4+1”方法学[J]. 科技导报, 2009, 27(6): 3.

Research and Practice on Safety Resilience Impact Assessment Technology for Metropolitan Cities under Multi-disasters

ZHANG Jingyan^{1,2}, FAN Le¹, ZHANG Zewei¹, YU Wen^{1,2}, ZHU Lixin^{1,2}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. Disaster Prevention Research Center, Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100013, China)

Abstract: In view of the lack of effective evaluation methods and systems for the functional impact on the city in the whole process of disaster occurrence and development, as well as the deficiencies in the guidance of urban comprehensive disaster prevention and disaster prevention and resilient city construction, we use analytic hierarchy process, put forward a mathematical model based on Fuzzy evaluation, establish the weight vector and judgment matrix of multi-level indicators, and realize multi-level Multifactor assessment needs. Based on the urban safety resilience impact assessment index system, the hierarchical structure of the assessment index is realized and its weight is calculated. By using the relevant research results to carry out a case study for a mega city, improvement measures and optimization suggestions for its weak links are put forward.

Keywords: multi-disasters; city safety; resilience assessment