

基于兰西城市群地区的地震韧性评价

张家铭

兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州

收稿日期: 2022年5月4日; 录用日期: 2022年5月28日; 发布日期: 2022年6月2日

摘 要

基于兰西城市群的高速发展与区域内地震灾害的相互影响, 引入地震韧性理论, 以突破传统被动式救灾的局限。基于抵抗、适应和恢复三个阶段, 构建基于应灾全过程的地震韧性综合评价指标体系; 为了研究韧性评价中的模糊性与不确定性, 引入云模型对其定性概念进行定量转化。结果得到了关于兰西城市群的韧性能力评价水平, 为韧性方向的研究提供了一定的参考。

关键词

地震韧性, 熵权法, 云模型, 综合评价体系

Seismic Resilience Evaluation Based on Lanxi Urban Agglomeration

Jiaming Zhang

School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

Received: May 4th, 2022; accepted: May 28th, 2022; published: Jun. 2nd, 2022

Abstract

Based on the interaction between the rapid development of Lanxi urban agglomeration and regional earthquake disasters, the earthquake toughness theory is introduced to break through the limitations of traditional passive disaster relief. Based on the three stages of resistance, adaptation and recovery, a comprehensive evaluation index system of seismic resilience based on the whole process of disaster response is constructed. In order to study the fuzziness and uncertainty in resilience evaluation, cloud model is introduced to quantitatively transform its qualitative concept. The evaluation level of toughness ability of Lanxi urban agglomeration is obtained, which provides a certain reference for the research of resilience direction.

Keywords

Seismic Resilience, Entropy Weight Method, Cloud Model, Comprehensive Evaluation System

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地震是自然界中最严重的灾害，给人民生活带来了严重的损失。我国位于环太平洋地震带与喜马拉雅地震带之间，是遭受地震灾害最严重的国家之一；而我国西部地区更是地震多发区域，2008 至 2021 年共十四年间，我国西部城市地区内发生 6.0 级以上地震高达 24 次。随着当前城市的高速发展，城市的规模不断扩张，地震灾害对城市造成的破坏也不断加剧，对城市造成了严重的经济损失，对国民经济的健康快速发展造成了重大挑战[1]。基于此背景下，针对城市的地震灾害相关研究变得十分迫切。

2018 年 3 月我国决定以甘肃省省会兰州市、青海省省会西宁市为中心，包括 9 个地州市地区，构建联合经济地带，形成我国西部地区跨省区的城市群，以维护西北地区城市的繁荣发展与稳定[2]。

而随着城市群功能不断聚集，城市的结构也变得越来越复杂，城市汇集的人也在逐渐增多，对于兰西城市群来说，对区域内城市系统的防灾减灾研究是十分必要的。

20 世纪，生物学家 Holing 首次将韧性概念应用到生态学的研究范畴，提出生态韧性概念。随着社会的发展，“韧性”这一术语被应用到各个领域[3]；Bruneau 等，将自然灾害与城市韧性这一概念进行联系，提出灾害韧性是系统能够对自然灾害进行抵御，并能够有效恢复的能力[4]。我国学者针对灾害韧性，也进行了多方面的研究。张明斗等，基于生态环境、社会环境、经济水平和基础设施等方面提出韧性城市的建设策略[5]。杨雅婷等，基于城市社区的建筑空间环境及各类基础设施，构建城市韧性社区评价指标体系，在此基础上提出社区的灾害韧性提升措施[6]。黄浪等，根据韧性理论在安全科学领域的梳理，提出初始安全状态、系统毁损状态、恢复系统状态的系统安全韧性概念框架[7]。基于国内外学者的研究，韧性理论已逐步由生态领域向社会领域发展；而城市系统作为社会系统中重要的因素，与韧性理论相结合，是当前的热门趋势。

由于城市的复杂性与系统性等特点，城市的韧性能力指标同时存在主观性强、指标难以量化等问题。由李德毅教授提出的云模型理论[8]，可以对评价过程中定性概念与定量描述进行相互转换，并分析其中的不确定性与模糊性。故本文引入云模型理论，对城市系统的地震韧性能力进行分析，以此判定我国西北地区兰西城市群的韧性等级，采用实证研究对该模型的可靠性与有效性进行验证。

2. 构建综合评价指标体系

城市的地震韧性表现为：城市系统通过规划、设计、政治、经济、技术等方面来抵御突发性地震灾害；在面对地震时，可以迅速的进行资源的调配，以进行抵抗破坏，使城市快速恢复至正常水平，不断提升城市系统的抵御能力，使得城市系统自身处于不断演进的循环过程[9] [10]。本文根据城市地震的受灾全过程为主要原则，由抵抗阶段、适应阶段和恢复阶段为三个主要环节进行分析，如图 1 所示。结合西北地区城市系统中所存在的问题及特点，构建针对西北地震频发区域内的城市系统地震韧性评价指标体系。

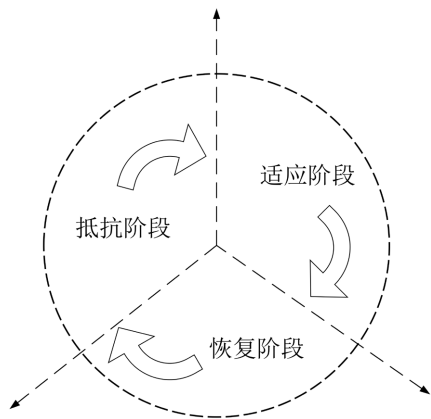


Figure 1. Whole process of urban earthquake disaster
图 1. 城市地震受灾全过程

其中，抵抗阶段包括震前的准备工作和地震灾害发生时的紧急响应，城市中各系统，如工程设施、居民与社会管理系统等，预先进行防灾减灾工作，能够减少所面临风险、维持城市功能；包括地震危险性，城市建筑等指标。适应阶段指在灾害发生时，城市功能降低的情况下，通过应急响应，减少损失程度，保证城市剩余功能高于失效的临界值，使城市系统仍可正常运行，实现自我调节的能力；包括交通能力、生命线工程、应急场所等指标。恢复阶段包括总结地震灾害时的经验教训，进行规划与重建，提高城市韧性水平，以便更好地应对下一次的灾害；如果城市及时采取有效的措施，加强城市适应学习的能力，也会使功能达到比灾前更高的水平；包括灾害保障、应急管理指标[11][12]。由这三个阶段不同特征，最终确定出 7 个二级指标，16 个三级指标，构建出针对西北地区兰西城市群系统地震韧性能力的多层次评价指标体系，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation index system of seismic resilience of Lanxi urban agglomeration system
表 1. 兰西城市群系统地震韧性能力评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
抵抗阶段 A ₁	地震危险性 B ₁	设防烈度 C ₁
		历史地震频次 C ₂
		火灾风险 C ₃
	城市建筑 B ₂	建筑密度 C ₄
		建筑结构比例 C ₅
适应阶段 A ₂	交通能力 B ₃	道路网络 C ₆
		疏散道路 C ₇
		燃气网络 C ₈
	生命线工程 B ₄	供水网络 C ₉
		通讯网络 C ₁₀
	应急场所 B ₅	避难场所覆盖率 C ₁₁
		人均开放空间 C ₁₂

Continued

恢复阶段 A ₃	灾害保障 B ₆	应急物资 C ₁₃
		救援设施 C ₁₄
	应急管理 B ₇	医疗机构 C ₁₅
		救援队伍人员 C ₁₆

3. 模型计算

3.1. 熵权法计算权重

由于评价因子中信息的多少直接影响评价决策的精度和可靠性，要对兰西城市群的地震韧性能力进行评价，首先需要对各指标的权重进行确定。引入熵权法对权重进行计算，属于客观赋权法，权重的确定主要依靠数据间的内在联系，利用熵值对系统的无序程度或有效信息量进行度量，具有客观性强的特点。利用被评价对象的指标值构成的判断矩阵，以计算出其权重，具体步骤如下：

1) 对指标数据构成的属性矩阵 X 进行无量纲化处理。若指标属性为正向，其指标值越高代表其越优，即效益性指标，按式(1)进行计算；若指标属性为负向，其指标值越小代表其越优，即成本性指标，按式(2)进行计算，得到规范化决策矩阵 V [13]。

$$v_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (1)$$

$$v_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

式中： $\max(x_{ij})$ 和 $\min(x_{ij})$ 分别为不同城市中第 i 个指标的最大值和最小值； $i=1,2,\dots,n$ ， $j=1,2,\dots,m$ 。

2) 根据规范化决策矩阵 V ，按式(3)~(6)计算各指标的熵值 H_i [14]。设城市地震韧性能力评价问题中存在的评价指标个数为 n ，评价对象个数为 m 个城市，则第 i 个评价指标的熵 H_i 定义为

$$H_i = -k \sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (3)$$

$$f_{ij} = \frac{v_{ij}}{\sum_{i=1}^m v_{ij}} \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (5)$$

3) 根据各评价指标的熵值，按式(6)计算得到指标熵权 w_i 。

$$w_i = \frac{1 - H_i}{n - \sum_{j=1}^n H_i} (i=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

3.2. 云模型

云模型是一种基于传统模糊理论与概率分析的一种分析方法。作为一种可将定性概念转化为定量数值的不确定转换方法，能够更好反映出客观事实所具有的模糊性、随机性及其间的相关性。

云模型在数学上的表示为：设范围 U 是一个用数值表示的定量论域，针对 U 上的定性概念，若定量数值 $x \in U$ 是定性概念的一次随机实现， x 对事件的隶属度 $\mu(x) \in [0,1]$ 是具有稳定倾向的随机数[15]，如

式(7)(8)所示, 即:

$$\mu:U \rightarrow [0,1] \quad (7)$$

$$\forall x \in U, x \rightarrow \mu(x) \quad (8)$$

x 在论域 U 上的分布称为云(Cloud), 每一个 x 称为一个云滴。整体概念用期望 Ex 、熵 En 和超熵 He 这 3 个数字特征, 来表征云分布的模糊性与随机性。其中期望 Ex 代表云的定性特征, 熵 En 是定性特征不确定性的度量, 超熵 He 是熵 En 的熵, 由熵的随机性和模糊性共同决定[16], 如图 2 所示。

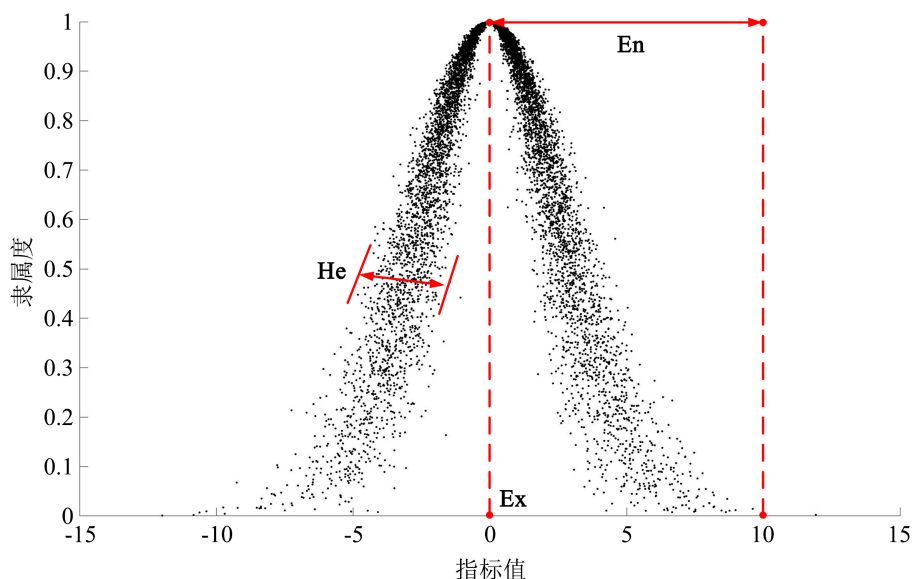


Figure 2. Digital feature composition of cloud model

图 2. 云模型的数字特征构成

具体步骤如下:

1) 逆向云发生器

通过逆向云算法将定量数值转化为定性概念, 将各个指标因素的指标数据 x_i 利用逆向云发生器转化成云模型的数字特征值[17]。计算步骤如式(9)~(12)所示。

$$Ex = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - Ex)^2 \quad (10)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \quad (11)$$

$$He = \sqrt{|S^2 - En^2|} \quad (12)$$

式中 Ex 为样本期望, n 为样本数量, x_i 为第 i 个指标值, En 为熵, He 为超熵, S^2 为样本方差。

对于西北地区兰西城市群中, 城市结构的复杂性、地震灾害的不确定性等方面, 基于云模型理论的 3 个数值特征(Ex , En , He)能够有效地解决定性评估指标的定量化的问题, 更加贴合实际, 反映出综合评价问题的本质。

把三级指标数字特征矩阵分别与三级指标的权重进行合成运算，向上聚合得到二级与一级指标云数字特征，进一步得出综合云数字特征，如式(13)所示。

$$(Ex', En', He') = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n) \begin{pmatrix} Ex_1 & En_1 & He_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ Ex_n & En_n & He_n \end{pmatrix} \tag{13}$$

式中 Ex' ， En' ， He' 分别为更高等级的数字特征。

2) 建立标准云

基于韧性能力的特征分析，并对相关文献及依据进行参考[18]，将城市抗震韧性划分为 5 个等级，按式(14)计算标准云的数字特征，得到 I~V 级的取值区间及数字特征。

$$\begin{cases} \overline{Ex} = \frac{S_j^{\max} + S_j^{\min}}{2} \\ \overline{En} = \frac{S_j^{\max} - S_j^{\min}}{6} \\ \overline{He} \in \left[\frac{Ex}{100}, \frac{En}{10} \right] \end{cases} \tag{14}$$

其中， $\overline{Ex}$ 为标准云的期望， $\overline{En}$ 为标准云的熵， $S_j^{\max}$ 为第 j 个区间的上限值， $S_j^{\min}$ 为第 j 个区间的下限值， $\overline{He}$ 为标准云的超熵。评价等级、等级描述和数字特征见表 2。将计算得出的云数字特征和标准云的数字特征带入云发生器中，可得到兰西城市群韧性水平云图，通过云图对比分析得出研究区域城市系统地震韧性的评价等级。

Table 2. Digital characteristics of resilience evaluation grade
表 2. 韧性评价等级数字特征

评价等级	等级名称	等级描述	分值区间	标准云数字特征
I	低韧性	抵抗地震能力低，遭遇时地震造成损失大，震后无法有效救援，恢复安全状态时间长。	[0, 0.2)	(0.1, 0.033, 0.01)
II	较低韧性	抵抗地震能力较低，地震造成损失较大，震后可部分采取救援活动，需较长时间使城市系统恢复安全状态。	[0.2, 0.4)	(0.3, 0.033, 0.01)
III	基本韧性	具有一定的抵抗地震能力，地震造成损失中等，震后能够采取救援活动，能在一定时间内使城市系统恢复安全状态。	[0.4, 0.6)	(0.5, 0.033, 0.01)
IV	较高韧性	地震抵抗能力较好，地震造成损失较小，震后能有效采取救援活动，能在较短时间内使城市系统恢复安全状态	[0.6, 0.8)	(0.7, 0.033, 0.01)
V	完全韧性	地震抵抗能力好，地震造成损失极低，震后能快速有效采取救援活动，能够快速使城市系统恢复安全状态。	[0.8, 1]	(0.9, 0.033, 0.01)

4. 实证研究

兰西城市群是我国西北地区黄河上游最大的城镇集聚区域，提升西部地区的人口集聚能力和经济发展活力，建立健全区域协调发展机制，沟通中国西南、西北和欧洲大陆，促进开放型经济向更广领域、更深层次和更高水平发展。为带动甘肃与青海两省的协调发展具有不可替代的作用。但由于其位置处于青藏高原与黄土高原板块交界处，其区域内城市坐落于多条构造带上，发生地震的风险较高，已经严重影响到城市的安全问题与经济的高速发展，因此，对兰西城市群的城市地震韧性能力进行有效评估，对于地震灾害的提前预测、针对性治理具有重要意义。

邀请 5 家西北地区建筑科研单位，共派出 5 位专家组成评价小组，为确保评价结果的可靠性，派出的每位专家均为高级工程师及以上，具有丰富的防震减灾方面工作经验。评价小组根据西北地区兰西城市群区域内城市构成、地理位置、经济发展等方面为准则进行重要度评价，并对指标因素进行打分，范围为 0~100 分，对所有专家的打分取平均值为最终得分，每项指标的最终得分如表 3 所示。

Table 3. Score of each evaluation index of the three-level index layer
表 3. 三级指标层各评价指标得分

城市	指标															
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
兰州市	56	75	82	45	67	71	59	96	72	65	42	67	71	64	62	58
白银市	62	81	63	54	49	68	52	88	66	53	35	53	46	47	53	42
定西市	48	65	66	67	42	58	50	85	43	46	38	54	32	42	50	51
临夏市	57	58	60	75	38	56	61	74	58	44	31	62	40	36	47	48
西宁市	77	69	78	50	58	72	60	97	69	66	45	73	68	59	58	61
海东州	69	43	54	80	45	56	46	86	64	42	37	66	54	42	42	54
海北州	64	51	59	77	43	57	52	69	42	39	33	70	52	43	46	49
海南州	59	64	61	74	46	49	54	78	51	45	31	72	32	51	50	43
黄南州	72	76	52	73	50	52	49	80	58	48	36	65	45	48	52	51

根据式(1)~(2)将指标数据进行无量纲化；由式(3)~(6)计算出指标层的熵值 H_i 及对应熵权 w_i ，结果如表 4 所示。

对无量纲化的指标数据进行数字特征(Ex, En, He)聚合，结果如表 5 所示。

Table 4. Entropy value H_i and corresponding entropy weight w_i of index layer
表 4. 指标层的熵值 H_i 及对应熵权 w_i

指标	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆
H_i	0.912	0.916	0.855	0.899	0.867	0.874	0.893	0.902	0.880	0.845	0.833	0.895	0.843	0.886	0.900	0.880
w_i	0.046	0.044	0.075	0.052	0.069	0.066	0.056	0.051	0.062	0.081	0.087	0.055	0.082	0.059	0.052	0.063

Table 5. Aggregation of digital characteristics of tertiary indicators
表 5. 三级指标数字特征聚合

指标	数字特征	指标	数字特征
C ₁	(0.516, 0.301, 0.068)	C ₉	(0.547, 0.358, 0.058)
C ₂	(0.580, 0.313, 0.089)	C ₁₀	(0.409, 0.358, 0.041)
C ₃	(0.406, 0.319, 0.110)	C ₁₁	(0.399, 0.323, 0.104)
C ₄	(0.613, 0.393, 0.127)	C ₁₂	(0.593, 0.348, 0.094)
C ₅	(0.378, 0.282, 0.123)	C ₁₃	(0.443, 0.353, 0.061)
C ₆	(0.483, 0.379, 0.109)	C ₁₄	(0.439, 0.298, 0.105)
C ₇	(0.521, 0.359, 0.074)	C ₁₅	(0.466, 0.286, 0.107)
C ₈	(0.534, 0.335, 0.033)	C ₁₆	(0.472, 0.309, 0.116)

根据权重 w_i 与三级指标数字特征，根据式(13)对二级指标与一级指标数字特征进行计算，如表 6 所示。将最终数字特征带入正向云发生器中，通过 Matlab 软件得到综合评价云图，如图 3 所示。

Table 6. Comprehensive digital characteristics of seismic resilience of Lanxi urban agglomeration
表 6. 兰西城市群地震韧性综合数字特征

数字特征	二级指标	权重	数字特征	三级指标	权重	数字特征
A1 (0.477, 0.333, 0.089)	B ₁	0.165	(0.483, 0.312, 0.093)	C ₁	0.046	(0.516, 0.301, 0.068)
				C ₂	0.044	(0.580, 0.313, 0.089)
				C ₃	0.075	(0.406, 0.319, 0.110)
	B ₂	0.122	(0.479, 0.329, 0.125)	C ₄	0.052	(0.613, 0.393, 0.127)
				C ₅	0.069	(0.378, 0.282, 0.123)
	B ₃	0.122	(0.501, 0.37, 0.093)	C ₆	0.066	(0.483, 0.379, 0.109)
				C ₇	0.056	(0.521, 0.359, 0.074)
	B ₄	0.194	(0.486, 0.352, 0.044)	C ₈	0.051	(0.534, 0.335, 0.033)
				C ₉	0.062	(0.547, 0.358, 0.058)
				C ₁₀	0.081	(0.409, 0.358, 0.041)
	B ₅	0.142	(0.474, 0.333, 0.100)	C ₁₁	0.087	(0.399, 0.323, 0.104)
				C ₁₂	0.055	(0.593, 0.348, 0.094)
	B ₆	0.141	(0.441, 0.330, 0.080)	C ₁₃	0.082	(0.443, 0.353, 0.061)
				C ₁₄	0.059	(0.439, 0.298, 0.105)
	B ₇	0.115	(0.469, 0.299, 0.112)	C ₁₅	0.052	(0.466, 0.286, 0.107)
				C ₁₆	0.063	(0.472, 0.309, 0.116)

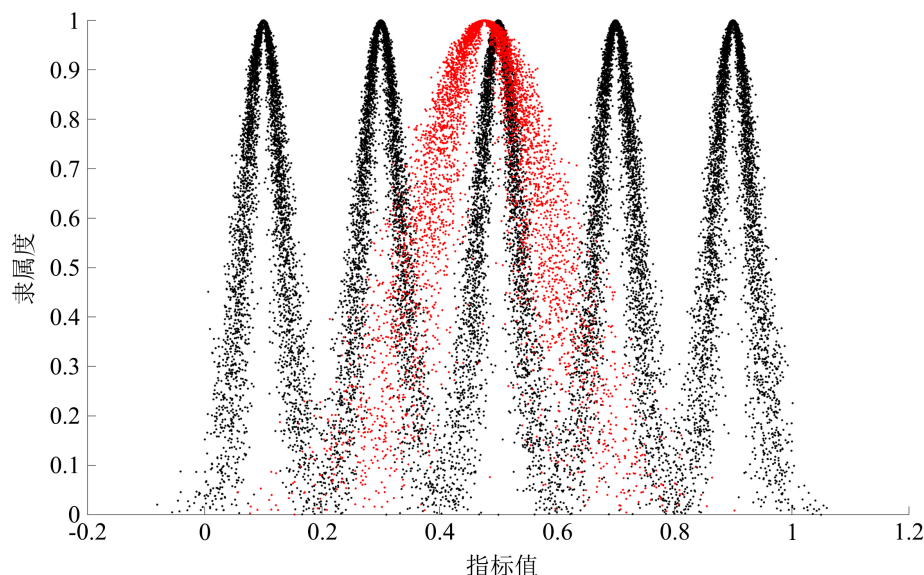


Figure 3. Comprehensive cloud chart of seismic resilience level of Lanxi urban agglomeration
图 3. 兰西城市群地震韧性能力水平综合云图

结果由表 6 可以得出,并由图 1 的云图中进行可视化表示。兰西城市群的城市地震韧性能力水平处于 III 级,即基本韧性水平,与该地域内城市实际建设情况与经济发展较为符合。其中以下几个方面还需进一步加强:建筑结构比例方面,由于老旧建筑,棚户区及不符合规范的建筑比例相较于发达城市比例较高,存在较大隐患;通讯网络建设方面,需要进行优化;避难场所覆盖率较低,应保障人员在面临地震灾害时,及时前往紧急避难区域,保障人民生命安全;救援设施还需要进一步加强,保证设施的齐全与充足[19][20]。

5. 结论

1) 本文根据西北地区兰西城市群的地理特征,结构规划及经济发展等特征,与韧性理论中地震应灾全过程抵抗阶段、适应阶段与恢复阶段三个阶段相结合;构建出科学合理的具有针对性的兰西城市群城市地震韧性能力综合评价指标体系。

2) 本文在权重的选取上采用熵权赋权法,减少了赋权的主观随意性,使评价指标权重能够更加合理,进而使评价结果可靠。

3) 本文基于熵权赋权法运用于云模型中,对兰西城市群城市地震韧性能力进行综合评价,综合考虑其中的模糊性与不确定性,最终得到该区域内的地震韧性水平,对西北地区地震防灾减灾方面具有一定的促进作用,并对其中薄弱因素的改善提供了参考。

参考文献

- [1] 贾春阳. 面向防灾减灾的城市灾害韧性及其评估研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [2] 邵迎. 兰西城市群开发区综合发展评价研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海师范大学, 2020.
- [3] Holling, C.S. (1973) Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- [4] Bruneau, M., Chang, S.E., Eguchi, R.T., et al. (2012) A Framework to Quantitatively Assess and Enhance the Seismic Resilience of Communities. *Earthquake Spectra*, **19**, 733-752. <https://doi.org/10.1193/1.1623497>
- [5] 张明斗, 冯晓青. 中国城市韧性度综合评价[J]. 城市问题, 2018(10): 27-36.

-
- [6] 杨雅婷. 抗震防灾视角下城市韧性社区评价体系及优化策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京工业大学, 2016.
- [7] 黄浪, 吴超, 杨冕等. 韧性理论在安全科学领域中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 1-6.
- [8] 李德毅, 刘常昱. 论正态云模型的普适性[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 28-34.
- [9] 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.
- [10] 王智怡. 城市公共安全韧性评估模型及提升策略研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [11] Bozza, A., Asprone, D. and Manfredi, G. (2015) Developing an Integrated Framework to Quantify Resilience of Urban Systems against Disasters. *Natural Hazards: Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards*, 78, 1729-1748. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1798-3>
- [12] 陈长坤, 陈以琴, 施波, 徐童. 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.
- [13] 万炳彤, 鲍学英, 李爱春. 西北寒旱地区铁路路基绿色施工水平综合评价[J]. 土木工程与管理学报, 2019, 36(3): 197-202.
- [14] 刘笑可. 基于 G1 法与熵权法的新型研发机构备案指标筛选研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2019.
- [15] 罗勋, 谢文强, 曾发镔. 基于云模型的复杂艰险山区深埋隧道施工通风系统综合评估[J]. 铁道学报, 2022, 44(3): 123-131.
- [16] 王威, 侯本伟, 苏经宇, 马东辉. 基于云化物元模型的供水管网抗震服务功能评价[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(7): 994-1001.
- [17] 李陶, 李付伟, 李向新, 许莹. 地震灾害风险的正态云模型综合评价——以毕节市为例[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(10): 166-171.
- [18] 翟长海, 刘文, 谢礼立. 城市抗震韧性评估研究进展[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 1-9.
- [19] 金书淼. 城市供水系统地震灾害风险及恢复力研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [20] 王萌. 甘肃省城市化与生态环境耦合协调发展研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021.