

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220426004

# 基于DSR-灰云模型的西北城市抗震韧性评估\*

樊燕燕, 刘轩谷

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 城市抗震系统是一个复杂的系统, 对其进行韧性评估是检验城市系统抗震能力的重要手段。在分析城市抗震系统构成的基础上, 结合DSR模型, 从抗灾因素、承灾因素和恢复因素三方面构建城市系统抗震韧性评估指标体系。为解决指标体系中存在的模糊性、随机性及灰色不确定等复杂问题, 引入灰色白化权函数云模型, 结合各指标的灰云模型图, 计算各指标实际的聚类系数, 最后根据最大隶属度原则计算出城市的抗震韧性评估等级。以西北地区14座城市为例, 验证该方法的可行性和合理性, 结果表明: 兰州市与武威市的城市抗震韧性等级为Ⅳ级, 白银、天水、张掖、平凉、酒泉、庆阳及定西7市的城市抗震韧性等级为Ⅲ级, 嘉峪关、金昌、陇南、合作与临夏5市的城市抗震韧性等级为Ⅱ级, 研究成果可为城市抗震韧性评估提供一种新方法。

**关键词:** 城市抗震韧性; DSR模型; 灰云模型; 韧性评估

**中图分类号:** X915.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1191-12

## Seismic Resilience Evaluation of Northwest Cities based on DSR-gray Cloud Model

FAN Yanyan, LIU Xuangu

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Urban seismic system is a complex system, and its resilience evaluation is an important means to test the seismic capacity of the urban system. On the basis of summarizing the concept of urban seismic resilience, combined with the DSR model, the evaluation index system for the seismic resilience of the urban system is constructed from three aspects: disaster resistance factors, disaster bearing factors and recovery factors. To solve the complex problems of fuzziness, randomness and gray uncertainty in the index system, the gray whitening weight function cloud model is introduced. Combined with the gray cloud model diagram of each index, the actual clustering coefficient of each index is calculated. Finally, the seismic resilience evaluation grade of the city is calculated according to the maximum membership principle. Taking 14 cities in Northwest China as examples, the feasibility and rationality of the presented method are verified. The results show that the urban seismic resilience of Lanzhou and Wuwei is classified as level IV, and that of Baiyin, Tianshui, Zhangye, Pingliang, Ji-quan, Qingyang and Dingxi is rated as level III, while that of Jiayuguan, Jinchang, Longnan, He-zuo and Linxia is at level II. The research results can provide a new method for the evaluation of urban

\* 收稿日期: 2022-04-26; 修回日期: 2022-06-13

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(20JR10RA237)资助

作者简介: 樊燕燕(1976—), 女, 副教授, 硕士。主要从事城市系统韧性研究。E-mail: 12062481@qq.com

通讯作者: 刘轩谷(1996—), 男, 硕士研究生。主要从事城市系统抗震韧性研究。E-mail: 469883393@qq.com

seismic resilience.

**Keywords:** urban seismic resilience; DSR model; gray cloud model; resilience evaluation

## 引言

城镇化的迅速发展与高速运转在为人类提供服务、改善生活的同时也无可避免地加快了城市脆弱性的进程,导致城市系统在面临自然灾害时会产生更大的损失。《国家综合防震减灾规划(2016-2020年)》中指出:“十三五”期间我国西部地区仍然处于7级以上强震的活跃时段,东部地区存在发生6级以上地震的可能。因此,城市地震风险巨大,地震灾害仍将对我国城乡可持续化发展构成严重威胁。2017年,中国地震局将韧性城市列为地震科技创新工程的四大计划之一。相比于传统的工程防灾与应急管理,韧性理论强调全社会的系统性,也更关注适应能力的长效性,为城市应对不确定的风险,降低扰动的负面影响,实现长效的适应性发展提供了新的研究思路<sup>[1-3]</sup>。

西北地区城市环境承载力较差、经济状况较为落后、医疗水平不够发达、人口流失严重、城市产业比例失衡且西北地区地震带较多、地震频发。这些原因导致西北地区城市的抗震韧性较差,当震害来临时将会遭受更加严重的损失。加强城市抗震韧性是西北地区城市抵御地震风险灾害的一项重要举措,因此,研究西北地区城市抗震韧性总体情况并探索合理的发展路径,对于提高西北地区城市抗震韧性水平,提升城市总体韧性,具有十分重大的意义。

近年来城市韧性的关注度不断增加,国内外学者对城市韧性展开了大量研究。在韧性及城市韧性方面,C.S.Holling<sup>[4]</sup>于1973年最先将韧性概念引入生态系统。他将生态系统的韧性定义为“生态系统在受到外界干扰后尽可能保全系统的稳定性,并且能在及时恢复受损功能的基础上进一步提升系统的能力”。M.Bruneau等<sup>[5]</sup>在前辈学者研究的基础上使用4R来阐述韧性,即鲁棒性、冗余性、策略性及快速性,并提出了关于地震灾害影响下的韧性评估框架。

国内对于城市抗灾韧性的研究起步较晚,且对于城市抗震韧性的研究较少。石立等<sup>[6]</sup>以韧性基线模型为研究依据,分别从西安市各个区县的经济、

社会、环境、基础设施、社区和组织等6方面入手构建城市灾害韧性评估指标体系。吴华清等<sup>[7]</sup>以洪涝灾害为例,运用熵权法从抵御、预警、应急和响应四个阶段对城市洪涝灾害进行韧性指标分析。杨春晨<sup>[8]</sup>运用德尔菲法及层次分析法对县城的防震韧性展开研究,通过承灾能力、应对能力、恢复能力及适应能力4个维度建立了防震韧性评估指标体系。谈力<sup>[9]</sup>以致灾因子危险性、承灾体暴露性、承灾体应对能力、承灾体恢复能力4个方面为准则建立了厦门市城市灾害综合评估指标。

虽然国内学者针对城市韧性及城市防灾韧性开展了大量研究,但评估指标体系的建立多借鉴国外学者的社区管理系统,与中国城市系统的兼容性较差,并不能很好地适用于我国的城市灾害韧性分析。另外,在评估方法上,多采用熵权法、德尔菲法及层次分析法,这些方法主观性较强,不能全面、系统地描述评估指标的内在联系。由于城市系统的复杂性,在进行信息决策及指标分析时存在一定的不完全性和随机性,这些方法也没有考虑到评估指标之间的模糊性及随机性等问题。

Driving force-State-Response模型(下文简称DSR模型)可以全面、系统地描述评估指标系统的内在关联,为城市抗震韧性评估体系的构建提供理论基础。灰色聚类法的灰数白化函数在各类风险评估中的应用已较为成熟,能够综合刻画决策信息的不完全性和随机性,但在地震灾害方面的应用较少。云模型可以综合考虑所选因素中的模糊性和随机性<sup>[10]</sup>。鉴于此,本文将西北地区城市特点与城市系统抗震韧性特征相结合,以灰云理论及DSR模型为基础,构建城市抗震韧性灰云模型及城市抗震韧性指标体系,为西北地区城市抗震韧性的评估和建设提供参考。

## 1 城市抗震韧性定义

由于国内对于城市抗震韧性的研究起步较晚、成果较少并多集中在城市韧性方面,对城市抗震韧性的研究较少且对城市抗震韧性的具体含义没有明确定义。翟长海等<sup>[11]</sup>通过整合国内外现有文献,将城市抗震韧性定义为:城市系统在受到地震影响

时维持或迅速恢复其功能的能力。该定义只考虑了地震发生过程中城市的维持或恢复功能的能力,而城市系统作为地震的空间承灾体,在地震发生期间具有抵抗、吸收、恢复及灾后的整合学习等特征。因此,本文参考前辈学者的相关文献,将城市抗震韧性定义为:城市系统在地震来临前具有一定的抵抗、预防措施,地震来临时能够维持城市系统原有机能,并在地震过后快速恢复机能且能够进行一定的学习调整的能力。

## 2 确定指标权重

本文采用 CRITIC(Criteria Importance Though Intercriteria Correlation)和 G1 方法组合赋权确定综合权重,以解决主客观权重分配不均衡而造成的权重不合理等问题<sup>[12]</sup>。

步骤 1:指标标准化。根据极值法对正向指标(越大越优型)和负向指标(越小越优型)进行无量纲标准化处理。

步骤 2:CRITIC 客观赋权。CRITIC 法是一种利用标准差和相关系数来反映自身属性差异程度和相关程度的客观赋权方法<sup>[13]</sup>。计算步骤如下:

第一步:计算待评估指标  $C_j$  的标准差  $\sigma_j$ 。

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (c_j^i - \bar{c}_j)^2}{m-1}} \quad (1)$$

式中,  $m$  为待评估城市的个数;  $\bar{c}_j$  为评估指标  $C_j$  的平均值;  $c_j^i$  为第  $i$  个城市中评估指标  $C_j$  的数值。

第二步:计算不同评估指标之间的相关系数  $r_{jp}$ 。

$$r_{jp} = \frac{\sum_{i=1}^m (c_j^i - \bar{c}_j)(c_p^i - \bar{c}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (c_j^i - \bar{c}_j)^2 (c_p^i - \bar{c}_p)^2}} \quad (2)$$

式中,  $\bar{c}_p$  为评估指标  $C_p$  的平均值;  $c_p^i$  为第  $i$  个城市中评估指标  $C_p$  的数值。

第三步:计算待评估指标  $C_j$  的客观权重  $w_{oj}$ 。

$$w_{oj} = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^n G_j}, G_j = \sigma_j \sum_{p=1}^n (1 - r_{jp}) \quad (3)$$

式中,  $n$  为待评估指标个数。

步骤 3:G1 主观赋权。G1 法又称序关系法,是一种改进的层次分析法,该方法能够依据专家或者决策者的丰富经验和实践,且无需进行一致性检验,从而确定待评估指标权重系数<sup>[14]</sup>。首先,根据各评估指标的重要程度进行排序,确定序关系。其次,对相邻指标的相对重要程度进行赋值。然后,对排序后的待评估指标根据已确定的相对重要程度进行权重计算。最后,在计算出的权重基础上,结合已确定的序关系,得到待评估指标的主观权重系数  $w_{sj}$ 。具体计算步骤参考文献<sup>[12]</sup>。

步骤 4:基于 CRITIC-G1 法的综合权重确定。通过 CRITIC 法和 G1 法分别得到客观权重  $w_{oj}$  和主观权重  $w_{sj}$ ,计算组合权重  $w_j$ 。

$$w_j = \frac{w_{oj} \times w_{sj}}{\sum_{j=1}^n w_{oj} \times w_{sj}}, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

## 3 正态灰云白化权模型

设  $U$  为用数值表示的定量论域,  $V$  为其对应的定性概念,若定量值  $x \in U$ ,且  $x$  是  $V$  上的一次随机实现,那么任意元素  $x$  对于  $V$  所表达的灰色概念的白化权都存在一个具有稳定倾向随机数,称为  $x$  对  $V$  的灰云白化权,而其在  $U$  上的分布称为灰云白化权函数,简称灰云。

灰云模型通过左右边界  $(L_x, R_x)$ 、峰值  $Z_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$  等特征数字来刻画定量概念。左右边界值  $(L_x, R_x)$  反映论域中灰色概念的数值范围;峰值  $Z_x$  是论域  $U$  中最能代表定性概念  $V$  的值,其白化权等于 1;熵  $E_n$  反映定性概念灰云的离散程度;超熵  $H_e$  是不确定性的度量,表明评估等级边界的随机性<sup>[15]</sup>。不同指标对应的数字特征计算方法见表 1。

表 1 灰云模型数字特征的计算方法

Table 1 The calculation method of digital feature of gray cloud model

| 指标区间类型           | $Z_x$           | $E_n$           | $H_e$   | 类型   |
|------------------|-----------------|-----------------|---------|------|
| $(0, R_x)$       | $(R_x + 0)/2$   | $(R_x - 0)/6$   | $E_n/q$ | 右半正态 |
| $(L_x, R_x)$     | $(L_x + R_x)/2$ | $(R_x - L_x)/6$ | $E_n/q$ | 正态   |
| $(L_x, +\infty)$ | $L_x$           | 相邻等级正态云的 $E_n$  | $E_n/q$ | 左半正态 |

注:  $q$  为给定常数,反映了  $E_n$  和  $H_e$  的线性关系,是用来调整云模型雾化程度的指标

### 3.1 正态灰云模型的实现

云模型的核心是构建云发生器来实现定性和定量的影射,将定性概念定量化的称为正向云发生器,反之称为逆向云发生器。正态云发生器定义如下:若 $x$ 满足 $x \sim N(Z_x, (E'_n)^2)$ ,其中, $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$ , $N$ 为云滴数,则 $x$ 对 $V$ 的隶属度可用白化权函数来表示为:

$$f_j^k(x) = \exp\left[\frac{-(x - Z_x)^2}{2(E'_n)^2}\right] \quad (5)$$

灰云模型生成算法为:输入数字特征 $(Z_x, E_n, H_e)$ ,输出云滴数 $N$ 。

①生成以 $Z_x$ 为期望, $E_n$ 为标准差的的正态随机数 $x$ 。

②生成一个以 $E_n$ 为期望、 $H_e$ 为标准差的正态随机数 $E'_n$ 。

③计算 $f_j(x)$ ,云滴为 $[x, f_j(x)]$ 。

④重复前3步,得到所需云滴。

### 3.2 正灰云模型的聚类

参考文献[16]的灰云聚类过程,其计算过程如下:

步骤1:取 $s$ 次计算得到平均灰云白化权值 $f_j^k(x_{ij})$ ,并将同一指标的各等级白化权值归一化,得到最终的指标灰云白化权值 $u_j^k(x_{ij})$ ,计算公式为:

$$f_j^k(x_{ij}) = [f_{j1}^k(x_{ij}) + f_{j2}^k(x_{ij}) + \dots + f_{js}^k(x_{ij})] / s \quad (6)$$

$$u_j^k(x_{ij}) = \frac{f_j^k(x_{ij})}{\sum_{k=1}^n f_j^k(x_{ij})} \quad (7)$$

式中, $x_{ij}$ 为第 $i$ 个待评估城市第 $j$ 个评估指标的数值; $f_{js}^k(x_{ij})$ 为第 $s$ 次计算的白化权值。

步骤2:计算综合聚类系数。待评估城市 $i$ 关于灰类 $k(o)$ 的综合聚类系数 $\sigma_{ik}$ 为:

$$\sigma_i^k(x_{ij}) = \sum_{j=1}^m u_j^k(x_{ij}) w_j \quad (8)$$

式中, $o$ 为城市抗震韧性等级。

步骤3:根据最大隶属度原则, $\max(\sigma_i^k)$ 所在灰类即为待评估城市的韧性等级。

## 4 评估指标体系构建

### 4.1 DSR模型及城市抗震韧性评估指标

经济发展合作组织于1996年提出了DSR模

型,该模型由D(驱动力),S(状态)及R(响应)三部分构成。DSR模型具有明确的因果关系,通过检测驱动力和环境状况、社会响应之间的逻辑反馈机制<sup>[17]</sup>,可以较好地反映系统相互作用的因果链关系。目前DSR模型的驱动力由人类活动组成,状态由自然资源、空气、水等环境状态组成,响应由政治、经济、法律等措施组成。城市抗震韧性的提升是城市总体韧性提升的关键途径,抗震韧性的提升受社会、经济和城市系统共同影响。然而,城市抗震韧性提升的驱动力、状态及响应内容与现有DSR模型存在一定的差异,因此,需对DSR模型进行修正,具体如下:

驱动力来自城市系统与公众对提升城市抗震韧性进而减小或避免损失的需求,通过该需求加强城市的抗震能力。状态为地震发生时城市生命线系统、建筑系统、人口系统等城市系统的受灾状态。响应代表地震发生过后,政府机构、城市医疗系统以及公众对于迅速解决灾后损失、提升城市抗震韧性的措施和态度。驱动力是状态发生变化的根本原因,状态是响应制定的基本依据,响应是促使状态发生变化的重要途径。上述修正DSR模型明确了提升城市抗震韧性行为中驱动力、状态、响应之间的因果关系,是制定城市系统抗震韧性评估指标体系的基础。

该模型与地震来临时城市的响应全周期相符,故基于“系统驱动力—系统状态—系统响应”指标框架体系,依据《中国地震动参数区划图》<sup>[18]</sup>《中国城市统计年鉴》<sup>[19]</sup>及参考文献[7-8,20],从抗灾因素、承灾因素及恢复因素三个评估准则出发,并对指标进行筛选,最终确定10个一级指标、33个二级指标,表2为基于DSR模型建立的城市抗震韧性评估指标体系。其中各指标变量的指标属性,正向指标“+”代表越大越优型、负向指标“-”代表越小越优型。

#### (1) 抗灾因素

抗灾因素:人类在生产建设过程中产生的驱动力将直接影响城市系统对于地震的抵抗程度。地震服务支出、城镇绿化面积、建筑物及构筑物性能、老旧小区改造等属于人类为了抵抗自然灾害而做出的各类行动,这些行动即为城市系统因素。除此之外,城市所在位置的近源地震等效等级等自然因素以及地震来临时所造成的次生灾害也会影响城

表2 城市系统抗震韧性评估指标  
Table 2 Evaluation index of urban seismic resilience

| 准则层                    | 一级指标                         | 二级指标                          | 指标计算说明                              | 指标属性 |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|------|
| D:抗灾因素                 | 自然因素 A <sub>1</sub>          | 城市近源地震等效等级 C <sub>1</sub>     | 设计基本加速度值( <i>g</i> )                | -    |
|                        |                              | 地震服务支出 C <sub>2</sub>         | 地震服务支出(万元/年)                        | +    |
|                        | 城市系统因素 A <sub>2</sub>        | 城镇化率 C <sub>3</sub>           | 城镇人数/总人数(%)                         | -    |
|                        |                              | 绿化面积 C <sub>4</sub>           | 城市绿化面积率(%)                          | +    |
|                        |                              | 构筑物性能 C <sub>5</sub>          | 2013年以后的构筑物所占比重(%)                  | +    |
|                        |                              | 建筑物性能 C <sub>6</sub>          | 2002年以后的建筑物所占比重(%)                  | +    |
|                        |                              | 老旧小区改造情况 C <sub>7</sub>       | 老旧小区改造数量(个)                         | +    |
|                        |                              | 路网密度 C <sub>8</sub>           | 道路网总里程占城市面积的比值(km/km <sup>2</sup> ) | -    |
| 次生灾害因素 A <sub>3</sub>  | 火灾因素 C <sub>9</sub>          | 城市燃气普及率(%)                    | -                                   |      |
| S:承灾因素                 | 生命线系统 A <sub>4</sub>         | 交通系统 C <sub>10</sub>          | 人均城市道路面积(m <sup>2</sup> )           | -    |
|                        |                              | 供水系统 C <sub>11</sub>          | 水网密度(m/km <sup>2</sup> )            | -    |
|                        |                              | 供电系统 C <sub>12</sub>          | 人均年用电量(kwh/年)                       | -    |
|                        |                              | 供气系统 C <sub>13</sub>          | 供气总量(万·m <sup>3</sup> )             | -    |
|                        |                              | 互联网系统 C <sub>14</sub>         | 互联网用户(万户/年)                         | -    |
|                        |                              | 通讯系统 C <sub>15</sub>          | 移动电话用户(万户/年)                        | -    |
|                        |                              | 电视通信系统 C <sub>16</sub>        | 电视综合人口覆盖率(%)                        | -    |
|                        | 广播通信系统 C <sub>17</sub>       | 广播综合人口覆盖率(%)                  | -                                   |      |
| 建筑结构系统 A <sub>5</sub>  | 建筑物密度 C <sub>18</sub>        | 建筑物的基底面积/规划建设面积(%)            | -                                   |      |
| 人口因素 A <sub>6</sub>    | 人口密度 C <sub>19</sub>         | 人口密度(人/km <sup>2</sup> )      | -                                   |      |
|                        | 老年人口 C <sub>20</sub>         | 60岁以上人口占比(%)                  | -                                   |      |
| R:恢复因素                 | 社会因素 A <sub>7</sub>          | 医院个数 C <sub>21</sub>          | 市区医院个数/(个)                          | +    |
|                        |                              | 医院床位数 C <sub>22</sub>         | 医院床位数(每千人均床位数)                      | +    |
|                        |                              | 医疗救助能力 C <sub>23</sub>        | 卫生从业人员数量(人)                         | +    |
|                        |                              | 社区自我组织情况 C <sub>24</sub>      | 社区卫生服务中心个数(个)                       | +    |
|                        |                              | 劳动人口占比 C <sub>25</sub>        | 15~59岁人口占比(%)                       | +    |
|                        |                              | 失业率 C <sub>26</sub>           | 失业人数/总人数(%)                         | -    |
| 经济因素 A <sub>8</sub>    | 经济多样性 C <sub>27</sub>        | 第三产业占比(%)                     | +                                   |      |
|                        | 国民消费力 C <sub>28</sub>        | 人均GDP(万元/年)                   | +                                   |      |
|                        | 地方一般公共预算收入 C <sub>29</sub>   | 一般公共预算收入(亿元/年)                | +                                   |      |
|                        | 城镇居民可支配收入 C <sub>30</sub>    | 人均可支配收入(万元/年)                 | +                                   |      |
| 规划与管理因素 A <sub>9</sub> | 公众对地震知识的普及程度 C <sub>31</sub> | 地震知识普及率(%)                    | +                                   |      |
| 城市应急系统 A <sub>10</sub> | 水资源应急能力 C <sub>32</sub>      | 城市水资源总量(亿 m <sup>3</sup> /年)  | +                                   |      |
|                        | 灾民安置能力 C <sub>33</sub>       | 人均大型避难场所面积(m <sup>2</sup> /人) | +                                   |      |

市对于地震的抵抗能力,这三项同属抗灾因素。

### (2) 承灾因素

承灾因素:地震发生过程中城市系统的各项子系统即为灾害承灾系统。城市系统的状态韧性高低将影响城市系统在地震过程中所受损害的大小。城市系统包括建筑结构系统以及生命线系统<sup>[11]</sup>,其中建筑结构系统以城市建筑密度为主,建筑密度越大,地震来临时城市的承灾能力越差。生命线系统

包括交通、供水、供电供气、互联网及通讯系统,该部分作为地震来临时城市主要的受灾系统,体现为受灾程度越大,城市的承灾能力越差。城市的人口因素也是决定系统承灾能力的关键因素,人口密度以及老年人口的占比越大,人口受伤的概率越高,即承灾能力越弱。

### (3) 恢复因素

恢复因素:城市系统的响应过程即为城市系统

受灾后的恢复过程,该部分由社会因素、经济因素及灾后政府所组织的规划与管理因素构成。社会因素主要体现为灾后的城市救援能力与效率:其中包括城镇医院数量、医院床位数量、相关卫生从业人员数量和各大社区的自我组织情况。还体现在劳动力等因素,例如劳动人口越多、失业率越低,灾后投入恢复的效率越高。经济因素也是影响城市灾后恢复的关键因素:经济的多样性、国民消费能力以及地方一般公共预算收入等共同影响灾后的恢复进程,尤其是地方一般公共预算收入,该项指标直接决定灾后政府的救助能力。城市应急系统包括灾民安置能力及水资源应急能力,该项指标同管理与规划因素能够反映出政府对于灾民的安置能力,以及后续的规划提高能力。这些因素共同影响城市系统的灾后恢复速度以及在面临下次地震灾害之前的学习及适应能力。

## 4.2 城市抗震韧性评估等级的确定

参考文献[11]将城市抗震韧性划分为5个等级,见表3。通过询问相关专家,参考文献[21]细化了城市抗震韧性评估指标的等级范围,具体量化结果见表4。根据表1中灰云模型数字特征的确定方法,并结合表4,可得各评估指标的灰云模型数字特征。由于篇幅所限,本文只列出抗灾因素 $C_1\sim C_9$ 的灰云数字特征,计算结果见表5。通过正向云发生器模拟出 $C_1\sim C_9$ 评估指标的灰云模型图,如图1~9所示。

根据各指标灰云模型图,即城市抗震韧性指标标线图,将实际指标值带入到灰云模型中,结合指标综合权重,可获得综合聚类系数,根据最大隶属度原则可确定各城市的韧性评估等级。

# 5 实例分析

## 5.1 实例背景

西北地区甘肃省位于强烈隆起的青藏高原东北部,境内地形地貌和地质构造极其复杂,且省内有南北地震带、河西走廊地震带及阿尔金地震带等三大地震带,地震频发。除此之外,毗邻的陕西省及四川省发生的地震往往也会波及到甘肃,致使发生严重的震灾。并且甘肃省的经济发展也较为落后,城市发展、医疗水平较差,人口流失严重。这意味着甘肃省在地震来临时将面对更多的挑战。因

此选取甘肃省的12个地级市、2个自治州进行城市抗震韧性研究。

## 5.2 数据收集与数据来源

本文对西北地区14个相关城市的抗震韧性指标数据进行收集和汇总,标准化后结果见表6。

其中, $C_1$ 来自《全国抗震烈度设防表》<sup>[22]</sup>;  $C_2\sim C_6$ 、 $C_{10}\sim C_{13}$ 、 $C_{18}\sim C_{19}$ 、 $C_{21}\sim C_{24}$ 、 $C_{27}\sim C_{29}$ 、 $C_{32}\sim C_{33}$ 来自《中国城市统计年鉴2021》<sup>[19]</sup>;  $C_7$ 来自各城市住房与城乡建设局官网所发布的相关文件;  $C_8\sim C_9$ 、 $C_{14}\sim C_{17}$ 、 $C_{30}$ 来自各大城市国民经济和社会发展统计公报;  $C_{20}$ 、 $C_{25}\sim C_{26}$ 来自第七次全国人口普查相关数据;  $C_{31}$ 来自各城市地震局官网相关文件。

## 5.3 数据计算

根据式(1)~(4)可计算各评估指标的权重,由于篇幅所限,本文只列出 $C_1\sim C_9$ 指标由CRITIC法确定的客观权重、由G1法确定的主观权重及综合权重,具体结果见表7。

## 5.4 灰云模型综合聚类与结果分析

### (1)综合聚类分析

运用Matlab编程,首先根据式(6)获得各评估指标的平均灰云白化权值 $f_j^*(x_{ij})$ ,其次利用式(7)~(8)算得各待评估城市的综合聚类系数 $\sigma_i^*$ ,最终获得各待评估城市的综合韧性等级,具体结果见表8。

### (2)结果分析

由表8可知,兰州、武威2市的城市抗震韧性等级为Ⅳ级,表现为城市抗震具有较高韧性。结合表6西北地区各城市待评价指标的标准化数据,以及表7各评估指标的综合权重进行评价指标对比分析可知,水资源应急能力、部分生命线系统以及地震服务支出等指标数据权重对城市的抗震韧性等级影响较大。因此,在维持原有城市系统的基础上,应对城市水资源应急能力、供水供电等生命线系统及地震服务支出等方面进行加强及提升。

白银、天水、张掖、平凉、酒泉、庆阳及定西7市的城市抗震韧性等级为Ⅲ级,表现为城市抗震具有基本韧性。应继续加强城市生命线系统的建设,城市规划及管理因素较差,城市系统因素中的构筑物与建筑物性能需不断提升。

嘉峪关、金昌、陇南、合作与临夏5市的城市抗震韧性等级为Ⅱ级,表现为城市抗震具有一般韧

表3 城市抗震韧性评估等级分类

Table 3 Evaluation grade classification of urban seismic resilience

| 评估等级 | 等级名称 | 等级描述   |
|------|------|--|
| I    | 较低韧性 | 城市系统抗震能力低,地震造成的损失大,震后救援效率低,恢复至安全状态时间长                |
| II   | 一般韧性 | 城市系统抗震能力较低,地震造成的损失较大,震后救援效率较低,恢复至安全状态时间较长            |
| III  | 基本韧性 | 城市系统具有一定的抗震能力,地震造成的损失中等,震后能够采取一定的救援活动,一定时间内可恢复至安全状态  |
| IV   | 较高韧性 | 城市系统具有较高的抗震能力,地震造成的损失较小,震后能够采取有效的救援活动,较短时间内可恢复至安全状态  |
| V    | 完全韧性 | 城市系统具有很高的抗震能力,地震造成的损失小,震后能够采取快速有效的救援活动,极短时间内可恢复至安全状态 |

表4 城市系统抗震韧性评估指标分级

Table 4 Evaluation index grade of urban seismic resilience

| 二级指标                         | 韧性等级               |                   |                 |                 |                  |
|------------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|-----------------|------------------|
|                              | I                  | II                | III             | IV              | V                |
| 城市近源地震等效等级 C <sub>1</sub>    | [0.4, 0.3)         | [0.3, 0.2)        | [0.2, 0.15)     | [0.15, 0.1)     | [0.1, 0.05]      |
| 地震服务支出 C <sub>2</sub>        | [0.18, 1.22)       | [1.22, 1.82)      | [1.82, 2.43)    | [2.43, 4.29)    | [4.29, 6.73]     |
| 城镇化率 C <sub>3</sub>          | [80%, 100%)        | [60%, 80%)        | [40%, 60%)      | [20%, 40%)      | [0%, 20%)        |
| 绿化面积 C <sub>4</sub>          | [20%, 25%)         | [25%, 30%)        | [30%, 35%)      | [35%, 40%)      | [40%, 45%)       |
| 构筑物性能 C <sub>5</sub>         | [0%, 15%)          | [15%, 30%)        | [30%, 45%)      | [45%, 60%)      | [60%, 75%)       |
| 建筑物性能 C <sub>6</sub>         | [0%, 15%)          | [15%, 30%)        | [30%, 45%)      | [45%, 60%)      | [60%, 75%)       |
| 老旧小区改造情况 C <sub>7</sub>      | [0, 100)           | [100, 200)        | [200, 300)      | [300, 400)      | [400, 500]       |
| 路网密度 C <sub>8</sub>          | [0.8, 1]           | [0.6, 0.8)        | [0.4, 0.6)      | [0.2, 0.4)      | [0, 0.2)         |
| 火灾因素 C <sub>9</sub>          | [90%, 100%)        | [80%, 90%)        | [70%, 80%)      | [60%, 70%)      | [50%, 60%)       |
| 交通系统 C <sub>10</sub>         | [18.67, 23.19]     | [13.30, 18.67)    | [8.8, 13.30)    | [3.72, 8.8)     | [0.5, 3.72)      |
| 供水系统 C <sub>11</sub>         | [0.49, 0.76]       | [0.26, 0.49)      | [0.11, 0.26)    | [0.07, 0.11)    | [0.03, 0.07)     |
| 供电系统 C <sub>12</sub>         | [11 000, 14 000]   | [8 000, 11 000)   | [4 000, 8 000)  | [2 000, 4 000)  | [1 000, 2 000)   |
| 供气系统 C <sub>13</sub>         | [100 000, 200 000] | [50 000, 100 000) | [8 000, 50 000) | [4 000, 8 000)  | [0, 4 000)       |
| 互联网系统 C <sub>14</sub>        | [100, 200]         | [80, 100)         | [60, 80)        | [40, 60)        | [0, 40)          |
| 通讯系统 C <sub>15</sub>         | [500, 700]         | [300, 500)        | [200, 300)      | [100, 200)      | [0, 100)         |
| 电视通信系统 C <sub>16</sub>       | [99.6%, 100%)      | [99.2%, 99.6%)    | [98.8%, 99.2%)  | [98.4%, 98.8%)  | [98.0%, 98.4%)   |
| 广播通信系统 C <sub>17</sub>       | [99.5%, 100%)      | [99%, 99.5%)      | [98.5%, 99%)    | [98%, 98.5%)    | [97.5%, 98%)     |
| 建筑物密度 C <sub>18</sub>        | [12%, 15%)         | [9%, 12%)         | [6%, 9%)        | [3%, 6%)        | [0%, 3%)         |
| 人口密度 C <sub>19</sub>         | [1 000, 1 500]     | [500, 1 000)      | [200, 500)      | [100, 200)      | [0, 100)         |
| 老年人口 C <sub>20</sub>         | [19%, 20%)         | [18%, 19%)        | [17%, 18%)      | [16%, 17%)      | [15%, 16%)       |
| 医院个数 C <sub>21</sub>         | [0, 20)            | [20, 40)          | [40, 60)        | [60, 80)        | [80, 100]        |
| 医院床位数 C <sub>22</sub>        | [0, 3)             | [3, 6)            | [6, 11)         | [11, 17)        | [17, 25]         |
| 医疗救助能力 C <sub>23</sub>       | [0, 3 000)         | [3 000, 6 000)    | [6 000, 9 000)  | [9 000, 12 000) | [12 000, 15 000] |
| 社区自我组织情况 C <sub>24</sub>     | [0, 30)            | [30, 60)          | [60, 90)        | [90, 120)       | [120, 150]       |
| 劳动人口占比 C <sub>25</sub>       | [60%, 62%)         | [62%, 64%)        | [64%, 66%)      | [66%, 68%)      | [68%, 70%)       |
| 失业率 C <sub>26</sub>          | [1.6%, 2.0%)       | [1.2%, 1.6%)      | [0.8%, 1.2%)    | [0.4%, 0.8%)    | [0%, 0.4%)       |
| 经济多样性 C <sub>27</sub>        | [20%, 32%)         | [32%, 44%)        | [44%, 56%)      | [56%, 68%)      | [68%, 80%)       |
| 国民消费力 C <sub>28</sub>        | [0, 2)             | [2, 4)            | [4, 8)          | [8, 10)         | [10, 20]         |
| 地方一般公共预算收入 C <sub>29</sub>   | [0, 20)            | [20, 40)          | [40, 60)        | [60, 80)        | [80, 300]        |
| 城镇居民可支配收入 C <sub>30</sub>    | [1, 2)             | [2, 3)            | [3, 4)          | [4, 5)          | [5, 8]           |
| 公众对地震知识的普及程度 C <sub>31</sub> | [90%, 92%)         | [92%, 94%)        | [94%, 96%)      | [96%, 98%)      | [98%, 100%)      |
| 水资源应急能力 C <sub>32</sub>      | [0, 4)             | [4, 8)            | [8, 12)         | [12, 16)        | [16, 40]         |
| 灾民安置能力 C <sub>33</sub>       | [0, 5)             | [5, 10)           | [10, 15)        | [15, 20)        | [20, 25]         |

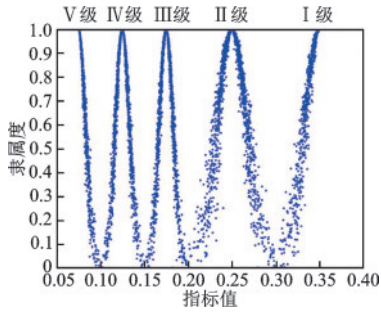


图1 城市近源地震等级  $C_1$  灰云模型  
Fig.1 Gray cloud model diagram of urban near source earthquake grade

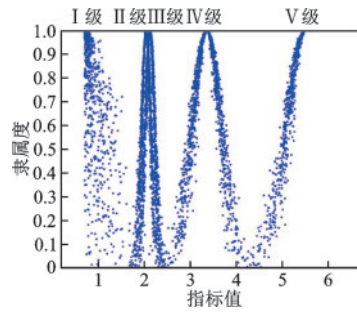


图2 地震服务支出  $C_2$  灰云模型  
Fig.2 Gray cloud model diagram of earthquake service expenditure

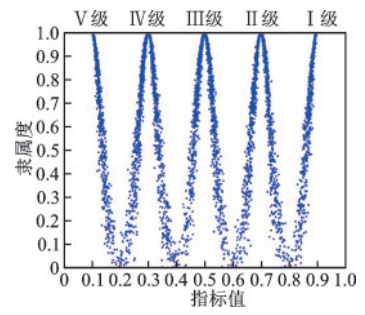


图3 城镇化率  $C_3$  灰云模型  
Fig.3 Gray cloud model diagram of urbanization rate

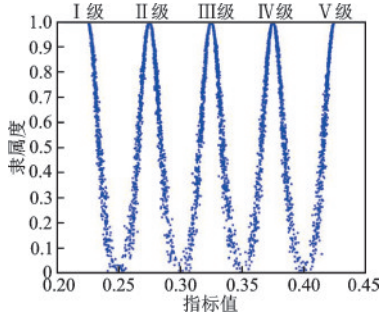


图4 绿化面积  $C_4$  灰云模型  
Fig.4 Gray cloud model diagram of green area

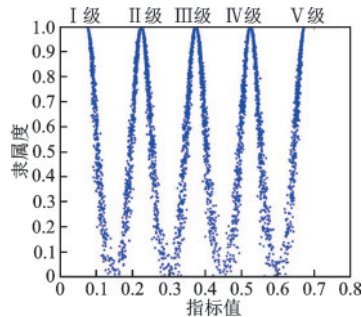


图5 构筑物性能  $C_5$  灰云模型  
Fig.5 Gray cloud model diagram of structure performance

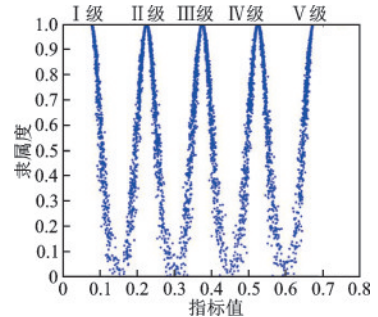


图6 建筑物性能  $C_6$  灰云模型  
Fig.6 Gray cloud model diagram of building performance

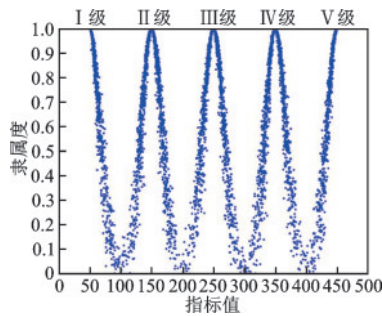


图7 老旧小区改造情况  $C_7$  灰云模型  
Fig.7 Gray cloud model diagram of old community reconstruction

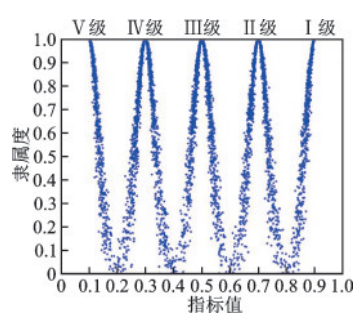


图8 路网密度  $C_8$  灰云模型  
Fig.8 Gray cloud model diagram of road network density

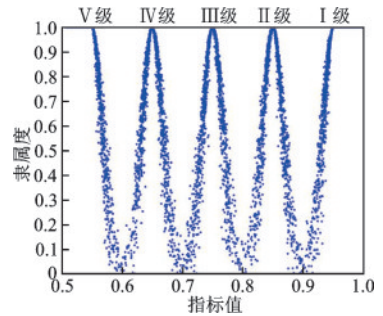


图9 火灾因素  $C_9$  灰云模型  
Fig.9 Gray cloud model diagram of fire factors

表5  $C_1 \sim C_9$  评估指标的灰云数字特征

Table 5 Gray cloud digital feature of  $C_1 \sim C_9$  evaluation index

| 评估指标  | 韧性等级                  |                       |                       |                       |                       |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|       | I                     | II                    | III                   | IV                    | V                     |
| $C_1$ | (0.35, 0.017, 0.003)  | (0.25, 0.017, 0.003)  | (0.175, 0.008, 0.001) | (0.125, 0.008, 0.001) | (0.075, 0.008, 0.001) |
| $C_2$ | (0.7, 0.173, 0.288)   | (2.04, 0.1, 0.017)    | (2.125, 0.102, 0.017) | (3.36, 0.310, 0.052)  | (5.508, 0.407, 0.068) |
| $C_3$ | (0.9, 0.033, 0.006)   | (0.7, 0.033, 0.006)   | (0.5, 0.033, 0.006)   | (0.3, 0.033, 0.006)   | (0.1, 0.033, 0.006)   |
| $C_4$ | (0.225, 0.008, 0.001) | (0.275, 0.008, 0.001) | (0.325, 0.008, 0.001) | (0.375, 0.008, 0.001) | (0.425, 0.008, 0.001) |
| $C_5$ | (0.075, 0.025, 0.004) | (0.225, 0.025, 0.004) | (0.375, 0.025, 0.004) | (0.525, 0.025, 0.004) | (0.675, 0.025, 0.004) |
| $C_6$ | (0.075, 0.025, 0.004) | (0.225, 0.025, 0.004) | (0.375, 0.025, 0.004) | (0.525, 0.025, 0.004) | (0.675, 0.025, 0.004) |
| $C_7$ | (50, 16.667, 2.778)   | (150, 16.667, 2.778)  | (250, 16.667, 2.778)  | (350, 16.667, 2.778)  | (450, 16.667, 2.778)  |
| $C_8$ | (0.9, 0.033, 0.006)   | (0.7, 0.033, 0.006)   | (0.5, 0.033, 0.006)   | (0.3, 0.033, 0.006)   | (0.1, 0.033, 0.006)   |
| $C_9$ | (0.95, 0.017, 0.003)  | (0.85, 0.017, 0.003)  | (0.75, 0.017, 0.003)  | (0.65, 0.017, 0.003)  | (0.55, 0.017, 0.003)  |

表6 西北地区城市抗震韧性评估指标标准化数据

Table 6 Standardized data of urban seismic resilience evaluation index in Northwest China

| 序号 | 城市   | C <sub>1</sub>  | C <sub>2</sub>  | C <sub>3</sub>  | C <sub>4</sub>  | C <sub>5</sub>  | C <sub>6</sub>  | C <sub>7</sub>  | C <sub>8</sub>  | C <sub>9</sub>  | C <sub>10</sub> | C <sub>11</sub> |
|----|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1  | 兰州市  | 0.400           | 1.000           | 0.159           | 0.967           | 0.741           | 0.821           | 1.000           | 0.731           | 0.111           | 0.436           | 0.000           |
| 2  | 嘉峪关市 | 0.600           | 0.099           | 0.000           | 1.000           | 0.328           | 0.196           | 0.005           | 0.307           | 0.044           | 0.199           | 0.834           |
| 3  | 金昌市  | 0.600           | 0.125           | 0.270           | 0.900           | 0.000           | 0.000           | 0.000           | 0.048           | 0.556           | 0.000           | 0.984           |
| 4  | 白银市  | 0.000           | 0.190           | 0.587           | 0.833           | 0.086           | 0.143           | 0.475           | 0.015           | 0.422           | 0.388           | 0.912           |
| 5  | 天水市  | 0.000           | 0.256           | 0.825           | 0.967           | 0.724           | 0.821           | 0.209           | 1.000           | 1.000           | 0.804           | 0.943           |
| 6  | 武威市  | 0.400           | 0.191           | 0.746           | 0.833           | 1.000           | 1.000           | 0.468           | 0.358           | 0.600           | 1.000           | 0.974           |
| 7  | 张掖市  | 0.800           | 0.174           | 0.651           | 0.900           | 0.655           | 0.786           | 0.241           | 0.306           | 0.000           | 0.705           | 0.885           |
| 8  | 平凉市  | 0.600           | 0.177           | 0.762           | 0.967           | 0.431           | 0.589           | 0.069           | 0.932           | 0.844           | 0.419           | 0.678           |
| 9  | 酒泉市  | 0.600           | 0.250           | 0.460           | 0.900           | 0.448           | 0.375           | 0.567           | 0.000           | 0.000           | 0.364           | 0.901           |
| 10 | 庆阳市  | 1.000           | 0.306           | 0.825           | 0.700           | 0.138           | 0.089           | 0.584           | 0.385           | 0.333           | 0.634           | 0.669           |
| 11 | 定西市  | 0.600           | 0.159           | 0.857           | 0.533           | 0.672           | 0.732           | 0.315           | 0.633           | 0.489           | 0.747           | 0.976           |
| 12 | 陇南市  | 0.400           | 0.172           | 0.921           | 0.833           | 0.207           | 0.250           | 0.000           | 0.671           | 0.400           | 0.858           | 0.999           |
| 13 | 合作市  | 0.800           | 0.000           | 1.000           | 0.033           | 0.224           | 0.143           | 0.000           | 0.002           | 0.733           | 0.878           | 0.988           |
| 14 | 临夏市  | 0.800           | 0.015           | 0.905           | 0.000           | 0.138           | 0.107           | 0.005           | 0.305           | 0.511           | 0.890           | 1.000           |
| 序号 | 城市   | C <sub>12</sub> | C <sub>13</sub> | C <sub>14</sub> | C <sub>15</sub> | C <sub>16</sub> | C <sub>17</sub> | C <sub>18</sub> | C <sub>19</sub> | C <sub>20</sub> | C <sub>21</sub> | C <sub>22</sub> |
| 1  | 兰州市  | 0.946           | 0.000           | 0.000           | 0.000           | 0.000           | 0.095           | 0.000           | 0.000           | 0.400           | 1.000           | 1.000           |
| 2  | 嘉峪关市 | 0.000           | 0.933           | 1.000           | 1.000           | 0.000           | 1.000           | 0.932           | 0.998           | 0.800           | 0.062           | 0.010           |
| 3  | 金昌市  | 0.884           | 0.974           | 0.994           | 0.983           | 0.563           | 0.429           | 0.916           | 1.000           | 0.200           | 0.113           | 0.031           |
| 4  | 白银市  | 0.961           | 0.934           | 0.825           | 0.795           | 1.000           | 0.095           | 0.877           | 0.937           | 0.000           | 0.247           | 0.116           |
| 5  | 天水市  | 1.000           | 0.948           | 0.576           | 0.274           | 0.313           | 0.238           | 0.951           | 0.878           | 0.400           | 0.691           | 0.391           |
| 6  | 武威市  | 0.988           | 0.975           | 0.797           | 0.785           | 0.813           | 0.429           | 0.970           | 0.888           | 0.000           | 0.289           | 0.180           |
| 7  | 张掖市  | 0.982           | 0.971           | 0.638           | 0.875           | 0.063           | 0.048           | 0.932           | 0.943           | 0.200           | 0.309           | 0.137           |
| 8  | 平凉市  | 0.997           | 0.989           | 0.017           | 0.765           | 1.000           | 0.333           | 0.863           | 0.844           | 0.000           | 0.299           | 0.146           |
| 9  | 酒泉市  | 0.966           | 0.989           | 0.814           | 0.860           | 0.000           | 0.000           | 0.916           | 0.959           | 0.400           | 0.227           | 0.083           |
| 10 | 庆阳市  | 0.996           | 0.989           | 0.718           | 0.684           | 0.000           | 0.000           | 0.839           | 0.739           | 0.200           | 0.155           | 0.143           |
| 11 | 定西市  | 0.995           | 1.000           | 0.718           | 0.681           | 0.563           | 0.381           | 0.970           | 0.953           | 0.200           | 0.103           | 0.106           |
| 12 | 陇南市  | 0.997           | 0.993           | 0.729           | 0.659           | 0.875           | 0.857           | 1.000           | 0.953           | 0.600           | 0.000           | 0.000           |
| 13 | 合作市  | 0.999           | 0.980           | 0.960           | 0.746           | 0.813           | 0.381           | 0.988           | 0.955           | 0.800           | 0.082           | 0.056           |
| 14 | 临夏市  | 0.997           | 0.989           | 0.774           | 0.801           | 0.563           | 0.429           | 0.989           | 0.934           | 1.000           | 0.124           | 0.060           |
| 序号 | 城市   | C <sub>23</sub> | C <sub>24</sub> | C <sub>25</sub> | C <sub>26</sub> | C <sub>27</sub> | C <sub>28</sub> | C <sub>29</sub> | C <sub>30</sub> | C <sub>31</sub> | C <sub>32</sub> | C <sub>33</sub> |
| 1  | 兰州市  | 1.000           | 1.000           | 1.000           | 0.581           | 0.920           | 0.689           | 1.000           | 0.808           | 1.000           | 0.069           | 0.582           |
| 2  | 嘉峪关市 | 0.019           | 0.000           | 1.000           | 0.581           | 0.280           | 1.000           | 0.075           | 1.000           | 0.500           | 0.057           | 0.771           |
| 3  | 金昌市  | 0.000           | 0.112           | 0.907           | 0.581           | 0.000           | 1.000           | 0.081           | 0.908           | 0.000           | 0.076           | 1.000           |
| 4  | 白银市  | 0.088           | 0.150           | 0.722           | 0.839           | 0.480           | 0.382           | 0.125           | 0.489           | 0.375           | 0.000           | 0.307           |
| 5  | 天水市  | 0.161           | 0.305           | 0.352           | 0.806           | 0.660           | 0.063           | 0.209           | 0.350           | 0.375           | 0.413           | 0.193           |
| 6  | 武威市  | 0.174           | 0.021           | 0.537           | 0.935           | 0.720           | 0.081           | 0.113           | 0.414           | 0.625           | 0.371           | 0.095           |
| 7  | 张掖市  | 0.044           | 0.060           | 0.630           | 0.871           | 0.800           | 0.153           | 0.107           | 0.302           | 1.000           | 0.728           | 0.532           |
| 8  | 平凉市  | 0.048           | 0.172           | 0.259           | 0.871           | 0.880           | 0.045           | 0.131           | 0.398           | 0.000           | 0.177           | 0.300           |
| 9  | 酒泉市  | 0.040           | 0.073           | 0.907           | 0.806           | 0.780           | 0.212           | 0.151           | 0.789           | 0.500           | 1.000           | 0.464           |
| 10 | 庆阳市  | 0.062           | 0.047           | 0.167           | 0.871           | 0.520           | 0.452           | 0.244           | 0.508           | 0.250           | 0.163           | 0.229           |
| 11 | 定西市  | 0.062           | 0.073           | 0.352           | 1.000           | 0.980           | 0.009           | 0.097           | 0.244           | 0.625           | 0.526           | 0.294           |
| 12 | 陇南市  | 0.011           | 0.060           | 0.361           | 0.871           | 1.000           | 0.002           | 0.093           | 0.202           | 0.750           | 0.121           | 0.000           |
| 13 | 合作市  | 0.074           | 0.056           | 0.176           | 0.871           | 0.920           | 0.000           | 0.000           | 0.149           | 0.875           | 0.052           | 0.011           |
| 14 | 临夏市  | 0.104           | 0.099           | 0.000           | 0.000           | 0.866           | 0.030           | 0.013           | 0.000           | 0.500           | 0.133           | 0.005           |

表7 评估指标 C<sub>1</sub>~C<sub>9</sub>的权重Table 7 Weight data of C<sub>1</sub>~C<sub>9</sub>, evaluation index

| 评估指标           | CRITIC 权重 | G1 权重   | 综合权重    |
|----------------|-----------|---------|---------|
| C <sub>1</sub> | 0.037 4   | 0.062 0 | 0.013 1 |
| C <sub>2</sub> | 0.018 7   | 0.206 6 | 0.021 9 |
| C <sub>3</sub> | 0.030 2   | 0.040 3 | 0.006 9 |
| C <sub>4</sub> | 0.034 9   | 0.016 3 | 0.003 2 |
| C <sub>5</sub> | 0.032 9   | 0.645 0 | 0.120 1 |
| C <sub>6</sub> | 0.035 6   | 0.384 6 | 0.077 5 |
| C <sub>7</sub> | 0.027 9   | 0.112 7 | 0.017 8 |
| C <sub>8</sub> | 0.038 4   | 0.020 3 | 0.004 4 |
| C <sub>9</sub> | 0.036 5   | 0.027 0 | 0.005 6 |

表8 城市地震韧性综合评估等级

Table 8 Comprehensive evaluation grade of urban seismic resilience

| 城市   | 综合聚类系数  |         |         |         |         | 评估等级 |
|------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
|      | K(I)    | K(II)   | K(III)  | K(IV)   | K(V)    |      |
| 兰州市  | 0.125 2 | 0.211 0 | 0.238 6 | 0.324 7 | 0.022 5 | IV   |
| 嘉峪关市 | 0.014 8 | 0.297 2 | 0.196 2 | 0.112 5 | 0.242 5 | II   |
| 金昌市  | 0.075 2 | 0.143 2 | 0.127 4 | 0.052 6 | 0.012 5 | II   |
| 白银市  | 0.012 5 | 0.027 5 | 0.198 3 | 0.112 9 | 0.099 2 | III  |
| 天水市  | 0.126 7 | 0.074 2 | 0.492 6 | 0.086 4 | 0.289 4 | III  |
| 武威市  | 0.012 5 | 0.076 1 | 0.052 4 | 0.129 4 | 0.086 2 | IV   |
| 张掖市  | 0.112 3 | 0.172 4 | 0.338 2 | 0.017 8 | 0.073 4 | III  |
| 平凉市  | 0.001 3 | 0.112 3 | 0.283 4 | 0.239 1 | 0.097 2 | III  |
| 酒泉市  | 0.082 3 | 0.015 8 | 0.112 6 | 0.001 2 | 0.009 9 | III  |
| 庆阳市  | 0.112 0 | 0.410 2 | 0.721 1 | 0.241 2 | 0.341 2 | III  |
| 定西市  | 0.001 2 | 0.112 0 | 0.492 1 | 0.241 7 | 0.003 4 | III  |
| 陇南市  | 0.294 8 | 0.385 9 | 0.001 2 | 0.027 5 | 0.111 9 | II   |
| 合作市  | 0.124 1 | 0.247 1 | 0.167 2 | 0.001 5 | 0.006 7 | II   |
| 临夏市  | 0.096 8 | 0.196 3 | 0.081 4 | 0.012 4 | 0.112 5 | II   |

性。需尽快加强城市系统建设。地方一般公共预算收入、居民可支配收入与地震服务支出亟待提高。城市建成区面积占区域总面积比重较低,人口过于集中,可能导致地震来临时人员伤亡过大。这5市的城市系统因素较其他城市相比较低,需尽快加强。

### 5.5 提升措施

根据表7计算出的各评价指标综合权重数据以及表8得出的城市地震韧性评估等级,综合上述结果分析,对提升城市抗震韧性提出具体措施。

第一,加大地震服务支出比例,让地震服务的支出精准落到每一项亟待解决、改善及加强的项目中。其次,新建项目严格遵守《建筑抗震设计规范》<sup>[22]</sup>与《住宅建筑设计规范》<sup>[23]</sup>,提高建筑物与构

筑物的抗震性能、加强生命线系统建设,减少地震来临时的经济损失。针对棚户区及老旧小区,严格执行住建部下发的各项文件,赋予居民一定的开工决定、改造方案制定、配合施工、参与过程监督和后续管理、评估与反馈小区改造效果等权力。广泛普及燃气的使用方法和注意事项,安全科学地使用燃气资源,降低次生火灾发生的风险。

第二,对于人口密度、建筑物密度过大等问题,应加强“卫星城”建设、完善城市规划、健全交通网络、合理引导城市人口分流,这样可有效降低地震可能造成的人口损失问题。针对社会方面因素,完善救援系统,要求政府能在地震后快速做出救援响应;织密城市医疗服务网络、筑牢县域医疗服务基础,同时注重社区卫生服务中心的建设,保障人民生命安全。针对经济方面因素,加强城市各方面经

济建设;针对人民在地震中的损失,给予一定救助,保障人民基本生活。这将有助于震后城市的快速恢复。

第三,除了上述提升措施外,还需结合不同学科技术针对研究手段从传统技术转向人工智能领域。例如,在城市抗震韧性的研究过程中加入遥感技术、ArcGIS软件等应用,使研究手段不再局限于传统的数学模型计算,而是更偏向于人工智能仿生系统。这样可以很大程度上减少地震发生后的人工勘察等成本,最后得出的结论也更加具有说服力。同时,人工智能系统也可以为灾后的城市防震减灾规划提供一定的支撑。

## 6 结 论

从城市抗震韧性的概念及特点出发,重点研究了城市抗震韧性指标的建立及评估过程,并以西北地区城市为分析案例,得到以下结论:

(1)从复杂的城市系统出发,从抗灾因素、承灾因素和恢复因素3方面,构建了城市系统抗震韧性综合评估指标体系,包括了10个一级指标和33个二级指标。

(2)利用正态灰云白化权函数模型对城市抗震韧性进行评估,提出了一种基于DSR-灰云模型的城市抗震韧性综合评估新方法,有效地处理了城市系统抗震韧性评估过程中信息的模糊性及随机性等不确定因素。

(3)以西北地区的14个城市为例,通过最大聚类系数,确定了城市的抗震韧性评估等级,并提出了相应的提升措施,为韧性城市的建设提供了新思路。

### 参考文献:

- [1] 韩晓龙.震后居住建筑恢复性重建设计研究[D].济南:山东建筑大学,2012.  
Han X L.Study on restorative reconstruction design of residential buildings after earthquake [D].Ji'nan: Shandong Jianzhu University, 2012.(in Chinese)
- [2] 陈宣先,王培茗.韧性城市研究进展[J].世界地震工程,2018,34(3):78-84.  
Chen X X,Wang P M.Research progress on resilient cities[J].World Earthquake Engineering, 2018,34(3):78-84.(in Chinese)
- [3] 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.  
Fang D P,Li Z S,Li N, et al.Urban resilience: a perspective of system of systems in trio spaces[J].China Civil Engineering Journal, 2017, 50(7): 1-7. (in Chinese)
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973,4(1):1-23.
- [5] Bruneau M, Chang S E, Eguchi R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities[J].Earthquake Spectra, 2003, 19(4): 733-752.
- [6] 石立,井晓鹏.基于韧性基线模型的城市灾害韧性评价研究——以西安市为例[C]//面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划).北京:中国建筑工业出版社,2021:325-333.  
Shi L, Jing X P.Evaluation of urban disaster resilience based on resilience baseline model—a case study of Xi'an City[C]//Spatial governance for high-quality development Proceedings of 2021 China annual urban planning conference (01 urban safety and disaster prevention planning). Beijing: China Architecture and Building Press, 2021:325-333.(in Chinese)
- [7] 吴华清,方建,栾一博.基于灾害响应过程的城市洪涝灾害韧性评价[C]//面向高质量发展的空间治理——2021中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划).北京:中国建筑工业出版社,2021:368-378.  
Wu H Q,Fang J,Luan Y B.Evaluation of urban flood disaster resilience based on disaster response process [C]//Spatial governance for high-quality development Proceedings of 2021 China annual urban planning conference (01 urban safety and disaster prevention planning). Beijing: China Architecture and Building Press, 2021:368-378.(in Chinese)
- [8] 杨春晨.县城防震韧性评价指标体系研究[D].合肥:安徽建筑大学,2019.  
Yang C C. Study on evaluation index system of seismic toughness of county seat [D].Hefei: Anhui Jianzhu University, 2019.(in Chinese)
- [9] 谈力.韧性视角的厦门城市灾害综合风险评估研究[C]//活力城乡 美好人居——2019中国城市规划年会论文集(01城市安全与防灾规划).北京:中国建筑工业出版社,2019:90-101.  
Tan L. Research on comprehensive risk assessment of urban disasters in Xiamen from the perspective of resil-

- ience [C]//vibrant urban and rural beautiful living Proceedings of 2019 China annual urban planning conference (01 urban safety and disaster prevention planning). Beijing: China Architecture and Building Press, 2019: 90-101.(in Chinese)
- [10] 赵阳,王凤武,张云鹏. 基于变权灰云模型的深远海域海上风电场选址[J]. 上海海事大学学报, 2021, 42(4):53-60.  
Zhao Y, Wang F W, Zhang Y P. Offshore wind farm site selection in far-reaching sea areas based on variable-weight gray cloud model[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2021, 42(4): 53-60.(in Chinese)
- [11] 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.  
Zhai C H, Liu W, Xie L L. Progress of research on city seismic resilience evaluation [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 1-9.(in Chinese)
- [12] 柯斌,邱钰峻,张晓飞. 基于CRITIC-G1法赋权的铁路线路速度目标值综合评价[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(3):31-36.  
Ke B, Qiu Y J, Zhang X F. Comprehensive evaluation of railway speed target value based on CRITIC-G1 weight methods[J]. Railway Standard Design, 2020, 64(3): 31-36. (in Chinese)
- [13] 邹国良,刘娜. 基于组合赋权-云模型的离子型稀土矿开采工艺评价[J]. 有色金属科学与工程, 2021, 12(4):88-95.  
Zou G L, Liu N N. Evaluation on the mining technology of ion-adsorption rare earth ore based on combined weighting-cloud model [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021, 12(4): 88-95.(in Chinese)
- [14] 王伟明,徐海燕,张发明. 基于CRITIC-G1和Bonferroni算子的学术期刊综合评价研究[J]. 情报理论与实践, 2020, 43(5):104-109.  
Wang W M, Xu H Y, Zhang F M. Research on comprehensive evaluation of academic journal based on CRITIC-G1 and Bonferroni Operator[J]. Information Studies: Theory & Application, 2020, 43(5): 104-109. (in Chinese)
- [15] 黄琪嵩,焦玉婷,许波,等. 基于组合赋权灰云模型的老空区建设场地稳定性评价研究[J]. 现代矿业, 2021, 37(2):194-197.  
Huang Q S, Jiao Y T, Xu B, et al. Evaluation on the stability of construction site above old goaf based on combination weighting-gray cloud model[J]. Modern Mining, 2021, 37(2): 194-197.(in Chinese)
- [16] 王双川,贾希胜,胡起伟,等. 基于正态灰云模型的装备维修保障系统效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(7):1576-1582.  
Wang S C, Jia X S, Hu Q W, et al. Effectiveness evaluation for equipment maintenance support system based on normal grey cloud model [J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(7): 1576-1582.(in Chinese)
- [17] 李晓丹,杨灏,陈智婷,等. 基于DSR模型的煤矿废弃工业广场再开发时序评价体系[J]. 农业工程学报, 2018, 34(1):224-231.  
Li X D, Yang H, Chen Z T, et al. Evaluation system for prioritization tool to redevelop abandoned coal mine industry square based on DSR model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(1): 224-231.(in Chinese)
- [18] 中国地震动参数区划图:GB18036—2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015
- [19] 国家统计局. 2021中国城市统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2022.  
National Bureau of Statistics. 2021 China city statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022. (in Chinese)
- [20] 许兆丰,田杰芳,张靖. 防灾视角下城市韧性评价体系及优化策略[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(3):1-7.  
Xu Z F, Tian J F, Zhang J. Urban resilience evaluation system and optimization strategy from perspective of disaster prevention [J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(3): 1-7.(in Chinese)
- [21] Charles Z. Jenks Natural Breaks [EB/OL]. [2018-09-26]. [http://www. real-statistics. com/multivariate-statistics/cluster-analysis/jenks-natural-breaks](http://www.real-statistics.com/multivariate-statistics/cluster-analysis/jenks-natural-breaks).
- [22] 建筑抗震设计规范:GB50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [23] 住宅建筑设计规范:GB50368—2005[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2005.

(本文责编:池营营)