

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.02.16

基于压力-状态-响应模型框架的城市 地震综合易损性评价

李江龙, 樊燕燕

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为了科学评价城市地震灾害状况,降低城市易损性,基于压力-状态-响应模型框架,构建城市地震综合易损性评价指标体系,其中压力类、状态类、响应类指标分别为7、13、8项。应用熵权法确定了各评价指标的权重,提出基于云模型的城市综合易损性评价模型,并运用雷达图分析法实现城市内各个区综合易损性的相对高低。应用上述方法,对兰州市中心城区进行了震害综合易损性评价,结果表明:兰州市综合易损性等级偏向Ⅲ级,易损性中等,其中红古、安宁区的易损性程度较高,城关、七里河易损性程度较低;经济因素对各区域的易损性影响较大,通过对易损区域加强管理建设,提高城市的防震减灾能力。

关键词:城市综合易损性;压力-状态-响应;熵权法;云模型;雷达图分析法

中图分类号: P65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-8035(2021)02-0117-09

Comprehensive evaluation of urban earthquake vulnerability under the framework of PSR

LI Jianglong, FAN Yanyan

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

Abstract: Assessment indicator system of comprehensive earthquake vulnerability in cities is established, which is aimed to reduce the vulnerability in cities, for the purpose to conduct scientific evaluation on earthquake vulnerability. The system is based on pressure-state-response (PSR) model framework, respectively the indicator is 7, 13 and 8 items. The assessment model of comprehensive earthquake vulnerability in cities, based on cloud model, is brought up by determine the weights of each indicator through the method of entropy weight. At the same time, radar maps are applied to analyse the relativity of comprehensive vulnerability in different districts in cities. An evaluation on comprehensive vulnerability after earthquake damage in center districts in Lanzhou was conducted by application of above mentioned methods. The result shows that comprehensive vulnerability in Lanzhou deviates to level III with a medium vulnerability. Honggu and Anning Districts suffer from higher vulnerability while Chengguan and Qilihe Districts bear the lower. In addition, economic elements have a rather prominent impact on the vulnerability in the various districts. Reinforcing management and construction in more vulnerable districts can improve their capacity in the act of earthquake prevention and disaster reduction.

Keywords: urban comprehensive vulnerability; pressure-state-response; entropy weight method; cloud model; radar chart

0 引言

我国是世界上地震活动最强烈和地震灾害最严重

的国家之一。从全球地震带的划分来看,我国位于太平洋地震带和欧亚地震带之间,地质构造复杂。破坏性地震灾害对我国人民的生命财产安全和生产生活造成极

收稿日期: 2020-04-13; 修订日期: 2020-05-09

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划 (IRT15R29)

第一作者: 李江龙 (1996-), 男, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事城市防灾工程管理研究。E-mail: 1056356017@qq.com

通讯作者: 樊燕燕 (1976-), 女, 河南禹州人, 副教授, 主要从事土木工程建造与管理研究。E-mail: 12062481@qq.com

大的威胁^[1]。近年来我国地震活动频繁,给受灾地区的人们带来了沉痛的灾难,严重地阻碍和制约了我国的经济。尤其是 2008 年 5 月的汶川 8.0 级大地震,致使 87 406 人遇难或失踪,直接经济损失达 8 451 亿元;2014 年 4 月的玉树 7.1 级地震,致使 2 968 人遇难或失踪,造成实际经济损失超过 125 亿元。由此可见,研究抗震防灾具有明显的必要性和紧迫性。伴随着城市化进程的加快,在人口、建筑与财富聚集的同时也聚集了风险,一旦遭受地震,后果将不堪设想。对城市地震易损性研究是城市地震问题的重要研究内容,具有重要的科学实用价值与现实意义。

近年来,国内外学者越来越关注地震灾害的易损性研究。DUZGUN 等^[2]提出了集成的城市地震脆弱性评估框架,采用脆弱性指数全面考虑城市区域评估的结构易损性、社会经济易损性等。PASTICIER 等^[3]利用 SAP2000 对古建筑进行 IDA 分析,并利用分析结果对其地震易损性进行了评估。苏亮等^[4]利用层次分析法,提出了一种基于模糊相似理论的地震易损性分析方法,通过类比分析实现目标结构的易损性评估,极大地提高了结构地震易损性分析的计算效率。臧石磊等^[5]利用模糊综合评判法计算地震易损性矩阵,并对辽宁省的老旧砌体房屋进行震害预测;毕可为^[6]将模糊数学中的熵权法确定权重和相似理论引入到群体易损性中,可快速准确评估出群体建筑物的震害情况。虽然国内外在城市地震易损性方面的研究取得了诸多成果,但大部分是针对某一类承灾体的地震易损性分析,而对城市承灾系统的研究却十分罕见,对于城市易损性评价指标体系的建立和评价方法的研究尚处于不成熟的阶段,评价体系还难以达到统一标准。

在既有研究的基础上,本文综合考虑了城市地震易损性评价中指标选取存在的问题,引入压力-状态-响应模型(Pressure State Response, PSR)构建了城市地震易损性综合评价指标体系。利用熵权法确定指标的权重,将云理论与雷达图结合起来,构建城市地震易损性评价模型,解决城市地震综合易损性评价过程中的模糊性与随机性问题,并运用雷达图法解决了城市区域同一等级难以进行优劣评定问题,为城市合理配置防灾资源提供依据,提高城市的综合抗震防灾能力。

1 熵权、云模型的基本理论

1.1 熵权

熵是一个热力学概念,后由申农引入信息论,称之为信息熵。按照信息论基本原理的解释,熵是系统无序

程度的一个度量,而信息熵是系统有序程度的度量。一个指标的信息熵越小,则该指标的变异程度越大,在综合评价中所起的作用就越大,指标的权重越大^[7]。熵权法的基本思路是根据各变量的变异程度来确定各指标的权重,通过修正得到权重,所以运用熵权法可以保证结果的客观性和准确性。假设有 m 个待评价项目, n 个评价指标,形成原始判断矩阵 $R=(r_{ij})_{m \times n}$,通过式(1)与式(2)分别计算第 j 个指标的信息熵值与权重。

$$\begin{cases} p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \\ e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (2)$$

式中: p_{ij} ——第 i 个项目的第 j 个评价指标的权重值;

r_{ij} ——第 j 个指标下第 i 个项目的评价值;

m ——待评价项目个数;

e_j ——第 j 个指标的信息熵值;

ω_j ——第 j 个指标的权重。

1.2 云模型的基本理论

(1) 云模型的定义

设 X 是一个普通集合, $X = \{x\}$, 称为论域,对于论域中的任一元素 x ,都存在一个稳定倾向的随机数 $A(x) \in [0, 1]$ 与之相对应, $A(x)$ 叫做 x 对 A 的隶属度。如果论域中的元素是简单有序的,则 X 为基础变量,如若不是,根据某个法则 f ,将 X 映射到一个有序的论域 X' ,则 X' 为基础变量,隶属度在基础变量上的分布称为云^[8]。

(2) 云模型的数字特征

云模型通过使用三个数字特征:期望 Ex 、熵 En 、超熵 He 来表示语言值的数学性质。其中期望是最能代表定性概念的点,熵用来反映定性概念概率和模糊度,熵越大,概念所接受的范围也越大,概念就越模糊,超熵是熵的熵,用来反映云的离散程度及厚度。

2 城市地震综合易损性评价指标体系的建立

2.1 城市地震综合易损性的概念

目前,虽然有很多学者对地震易损性进行了定义,但仍未形成统一的定义。尹之潜^[9]认为,地震受体的易损性是指受体在确定强度地震的作用下,设定的极限状态的发生概率,受体可以是一座城市,也可以是城市里的建筑群或单体建筑。叶清^[10]指出,地震易损性是指一

个确定区域内由于地震发生造成损失的程 度,易损性是评定震害的一个指数,对地震预测区内未来地震造成建筑物破坏和损失程度作出的预测。综合上述观点,本文研究的 城市承灾体综合易损性是指:假定该城市在地震灾害的影响下,由涉及的自然、人、生命线系统、经济状况等所组成的承灾体系统在面临地震灾害时受到灾害破坏或损害程度的性质。该程度的大小主要由承灾体面临的震害压力、承灾体状态和响应程度决定。

2.2 压力-状态-响应 PSR 模型构建

PSR 模型由加拿大统计学家提出,20 世纪 80 年代到 90 年代,经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境规划署将 PSR 发展起来用以研究生态环境问题^[11]。该理论认为,人类的经济、社会活动与自然环境之间存在相互作用关系,即:人类从自然环境取得各种资源,通过生产消费又向环境排放,从而改变了资源的数量和环境的质量,进而影响了人类的经济社会活动及其福利,如此循环往复,形成了人类活动与自然环境之间的 PSR 关系^[11]。PSR 目前已被广泛应用于生态安全评价、生态系统健康状况评价。由于城市地震易损性高低涉及城市的震害压力、生命线系统等状态和响应程度的大小,所以利用 PSR 可以很好地表达各要素间的关系。

2.3 城市地震综合易损性评价指标体系

根据城市地震灾害的特点及易损性的概念,查询《城市抗震防灾规划管理规定》和《城市抗震防灾规划编制标准》等相关规范,综合考虑评价指标数据的可获取性,结合现有的文献^[12],遵循指标体系构建的基本原则:全面性、代表性、层次性与可操作性,基于 PSR 模型,遴选、总结和整合出 28 个变量构成评价指标体系(表 1)。

3 评价模型的构建

城市地震综合易损性是一个错综复杂的庞大体系,传统的评价方法难以衡量易损性评价过程中的模糊性与随机性,因此,本文引入了云模型,以解决城市地震综合易损性评价中的模糊性与随机性问题,并运用熵权法赋权,确定城市地震综合易损性等级。云模型可以对某一区域的综合水平进行评价,但对于同一等级的研究对象,无法对其相对优劣进行判定,且城市各个区综合地震易损性差异较小,为了明确各区的地震综合易损性程度,本文采用雷达图法确定各个区地震综合易损性相对高低。

3.1 确定易损性评价云

根据易损性的定义,本文引入云模型来量化城市地

震综合易损性的大小。应用逆向云发生器分别生成易损性评价云的数字特征,具体公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} Ex = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x_i \\ En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q |x_i - Ex| \\ He = \sqrt{S^2 - En^2} \\ S^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q (x_i - Ex)^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: Ex ——期望值;

q ——研究城市区域的数量;

x_i ——第 i 个区域的易损性指数值;

En ——熵;

He ——超熵;

S^2 ——城市易损性指数值方差。

3.2 构建评判等级的标准云

将城市地震易损性大小划分为 5 个等级^[13]。将区间 $[0,1]$ 等分为 5 个子区间,其中第 j 个子区间表示为 $[S_j^{\min}, S_j^{\max}]$ 。按照式(4)~式(6)确定标准云的数字特征(表 2)^[14]。

$$\overline{Ex} = \frac{S_j^{\max} + S_j^{\min}}{2} \quad (4)$$

$$\overline{En} = \frac{S_j^{\max} - S_j^{\min}}{2\sqrt{2}\ln 2} \quad (5)$$

$$\overline{He} = k \quad (6)$$

式中: \overline{Ex} 、 \overline{En} 、 \overline{He} ——分别为标准云的期望值、熵、超熵;

S_j^{\min} ——第 j 个区间的下边界值;

S_j^{\max} ——第 j 个区间的上边界值;

k ——常数,根据变量本身的模糊度确定^[15],本文取 0.01。

3.3 综合云

根据式(3)算出二级云特征数字矩阵,然后与二级权重矩阵进行合成运算,将二级权重根据二级指标的个数进行归一化处理,进一步得到一级云特征数字矩阵,然后将得出的一级云特征数字矩阵与一级权重矩阵进行合成运算,最后得到综合云数字特征。矩阵的合成运算方法如式(7)所示。

$$(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n) \begin{pmatrix} Ex_1 & En_1 & He_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Ex_n & En_n & He_n \end{pmatrix} = (Ex', En', He') \quad (7)$$

表 1 城市地震综合易损性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system for comprehensive vulnerability of urban earthquake

属性	一级指标	二级指标	指标计算说明	指标属性
压力(B ₁)	自然因素C ₁	城市近源地震等效等级C ₁₁	反映地震灾害危险度指数g	+
		城市化率C ₂₁	城镇人口占人口总数比例/%	+
	人为因素C ₂	年平均自然增长率C ₂₂	年平均自然增长率/%	+
		人口密度C ₂₃	人口密度/(人·km ⁻²)	+
		建筑物密度C ₂₄	建筑物的基底面积占规划建设面积比例/%	+
		老旧建筑物比例C ₂₅	老旧建筑物数量占建筑物数量比例/%	+
容积率C ₂₆	地上总建筑面积占可建设用地面积比例/%	+		
生命线系统C ₃	交通系统C ₃₁	公路网综合能力/(10 ⁴ m ²)	-	
	通讯系统C ₃₂	电信业务收入/万元	-	
	供电系统C ₃₃	供电量/万千瓦时	-	
	供水系统C ₃₄	供水总量、用水总量/(10 ⁴ m ³)	-	
	供气系统C ₃₅	供气总量/m ³	-	
状态(B ₂)	社会状态C ₄	14~65岁人口比例C ₄₁	14~65岁人口比例/%	-
		失业率C ₄₂	失业人数占人口总数比例/%	+
		教育C ₄₃	人均教育费用支出/元	-
		医疗C ₄₄	人均医疗卫生费用支出/元	+
经济状态C ₅	人均GDP C ₅₁	GDP/%	-	
	人均GDP增长率C ₅₂	人均GDP增长率/%	-	
	可支配收入C ₅₃	人均可支配收入/元	-	
	经济多样性C ₅₄	第三产业构成比例/%	-	
工程抗震C ₆	建筑物抗震能力C ₆₁	2002年以后的建筑物占总建筑物比例/%	-	
	构筑物抗震能力C ₆₂	2013年以后的构筑物占总建筑物比例/%	-	
响应(B ₃)	回复能力C ₇	医疗救助能力C ₇₁	病床数和医生数/10万人	-
		社会保障C ₇₂	人均抚恤和社会福利救济费/元	-
		地方财政收入C ₇₃	年末财政收入/万元	-
		应急避难所覆盖度C ₇₄	学校数和广场数/个	-
		避震减灾知识普及率C ₇₅	-	-
政府应急响应能力C ₇₆	-	-		

注: 指标属性中, “+”代表越大越优(正向)指标, “-”代表越小越优(逆向)指标。

表 2 评价等级数字特征表

Table 2 Digital characteristic of evaluation level

评价等级	取值区间	综合易损性	数字特征
I	[0.0,0.2)	低	(0.1,0.085,0.01)
II	[0.2,0.4)	较低	(0.3,0.085,0.01)
III	[0.4,0.6)	中等	(0.5,0.085,0.01)
IV	[0.6,0.8)	较高	(0.7,0.085,0.01)
V	[0.8,1.0]	高	(0.9,0.085,0.01)

式中: Ex' 、 En' 、 He' ——分别为更高等级的期望值、熵、超熵;

n ——评价指标的个数。

3.4 综合评价云图

利用 Matlab 对正向云发生器编程生成云图, 对综合

云与标准云进行分析对比, 初步得到评价对象整体的等级。

3.5 贴近度

考虑到评价结果存在相似性, 仅仅从综合评价云图上无法准确判别综合易损性等级, 提出一种综合易损性等级与标准云贴近程度的计算方法。贴近度越大, 城市综合易损性等级越靠近该评价云所对应的标准云等级, 计算公式如式 (8) 所示。

$$T = \frac{1}{|Ex - Ex'|} \quad (8)$$

式中: T ——综合易损性等级的贴近度。

3.6 雷达图分析

(1) 评价指标无量纲化处理

对各评价指标的基础数值进行标准化处理就是使

得标准化处理后的值在 [0,1] 范围内。指标处理如式 (9) 所示^[16]。

$$r'_{ij} = \begin{cases} \frac{r_{ij}}{\max r_{ij}} & \text{正向指标处理} \\ 1 - \frac{r_{ij}}{\max r_{ij}} & \text{逆向指标处理} \end{cases} \quad (9)$$

式中: r_{ij} ——第 j 个指标下第 i 个项目的评价值;

r'_{ij} ——第 j 个指标下第 i 个项目的评价转化值。

$\max r_{ij}$ ——第 j 个指标下所有项目的最大值。

(2) 评价指标权重与角度转换

评价指标中有 m 个指标,则在雷达图中绘制 m 条指标轴。通过式 (10) 将权重转化为指标轴之间的角度。

$$\theta_i = 360\omega_i \quad (10)$$

式中: θ_i ——夹角角度;

ω_i ——权重。

(3) 雷达图绘制

通过 Excel,对评价指标基础数值进行无量纲化处理,并投影在对应的评价指标数轴上,然后将投影点连接成线,绘制雷达图。

(4) 特征量计算

采取雷达图的平均面积和周长两个特征量,构造一个二维特征量来计算综合评价值的函数,并根据评价函数计算各评价对象的评价值。

$$\text{平均面积: } \bar{S}_x = \frac{m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i < j}^n \frac{1}{2} R_i R_j \sin \theta_{ij}}{C_n^2} \quad (11)$$

$$\text{周长: } \bar{L}_x = \frac{m \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{i < j}^n \sqrt{R_i^2 + R_j^2 - 2R_i R_j \cos \theta_{ij}}}{C_n^2} \quad (12)$$

式中: x ——拟评区域;

\bar{S}_x ——雷达图平均面积;

\bar{L}_x ——雷达图周长;

m ——评价指标数;

R ——指标轴的边长;

i, j ——其中的第 i, j 个指标;

θ ——两条边的夹角。

令 \bar{S}_x 为面积评价向量,则周长评价向量 \bar{V}_x 为:

$$\bar{V}_x = \frac{\bar{S}_x}{\pi(\bar{L}_x/2\pi)^2} \quad (13)$$

最后,各区域的综合评价值 Y_x 为:

$$Y_x = \sqrt{\bar{S}_x \times \bar{V}_x} \quad (14)$$

4 案例分析

甘肃省兰州市是西北地区重要的工业基地和交通枢纽,西部地区重要的中心城市之一,全市土地面积 13 085.6 km²,市内地貌类别多样。兰州处于祁连山地震带,历史上发生多次重大地震,造成极大损失。兰州市下辖 5 区、3 县和兰州新区。为了数据采集方便,本文以 5 区为研究对象建立综合评价指标体系,评定兰州市辖区的地震易损性等级,将各个区的易损性状况进行排序,从中也获得了其易损性高或低的原因。

4.1 研究对象及权重确定

本文选取兰州市 5 个中心城区(城关区、七里河区、西固区、安宁区、红古区)作为研究对象。邀请 13 位专家依据城市地震灾害的特点和兰州地域特色,针对前文建立的评价指标体系各项指标的重要程度进行打分,指标越重要,相对分值越高。根据式 (1) 与式 (2) 算得各个指标的权重,结果如下。

$$W\{C_{11} \sim C_{76}\} = \{0.030, 0.021, 0.039, 0.018, 0.038, 0.025, 0.014, 0.039, 0.045, 0.050, 0.046, 0.048, 0.018, 0.050, 0.038, 0.018, 0.051, 0.018, 0.031, 0.048, 0.039, 0.035, 0.044, 0.021, 0.055, 0.028, 0.049, 0.044\}$$

4.2 数据采集及处理

关于数据的采集,本文采用 2018 年《兰州市统计年鉴》和地方政府各部门公开报告中的统计数据。由于城市综合易损性的复杂性,针对表 1 中统计困难的指标 (C_{75}, C_{76}),本文采用问卷调查法确定;由于 C_{25}, C_{61}, C_{62} 难以量化^[17],本文以建筑业占第二产业的投资额比例衡量,其余指标按照统计实际数据计算。表 3 是 5 个中心城区的基础统计数据,将表 3 按照式 (9) 进行无量纲化处理(表 4)。

4.3 结果分析

根据式 (3) 和表 4,分别求得兰州中心城区二级指标的数字特征,运用式 (7) 将二级指标的数字特征与二级熵权矩阵进行合成运算,然后将一级指标的数字特征与一级熵权矩阵进行合成运算,得到兰州市中心城区的易损性云综合数字特征(表 5)。应用正向云发生器生成综合易损性与标准云对比云图(图 1)。从图 1 知,兰州中心城区综合易损性在 0.480 处隶属度最高,云滴也最为集中,然而,综合云的跨度大于标准云,说明评价结果具有一定的模糊性,综合云的厚度大于标准云,说明评价结果存在一定的随机性。根据式 (8) 计算贴近度。结果表明:兰州市中心城区的综合易损性等级偏向 III 级,易损状况中等,该评价结果说明兰州中心城区的综合易损性勉强满足城市承受震害能力的要求,但

表 3 兰州市 5 个中心城区的基础数据统计
Table 3 Basic data statistics of five central urban districts in Lanzhou City

指标	C_{11}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
城关区	0.200	99.120	0.030	6 332.000	13.120	6.230	4.800	624.660	239 568.750	102 878.160
七里河区	0.200	83.610	0.360	1 458.000	15.560	15.300	3.800	1 153.230	117 122.500	45 088.580
西固区	0.200	87.280	0.110	1 023.000	17.890	17.750	3.670	1 105.180	101 151.250	29 424.000
安宁区	0.200	100.000	0.000	3 443.000	20.860	19.010	3.190	288.310	42 590.000	23 285.180
红古区	0.150	78.170	0.400	263.000	27.120	26.100	3.100	1 633.740	31 942.500	11 007.540
指标	C_{34}	C_{35}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}
城关区	8 950.359	2 041.200	82.400	1.910	1 188.000	1 009.000	72 396.000	6.900	36 326.000	86.300
七里河区	3 922.685	894.600	82.100	1.960	1 324.000	1 124.000	79 074.000	6.000	28 534.000	62.600
西固区	2 559.875	583.800	81.300	2.010	1 751.000	1 487.000	110 782.000	4.300	33 150.000	38.200
安宁区	2 025.805	462.000	83.600	1.830	935.000	794.000	59 814.000	6.600	32 574.000	61.500
红古区	957.650	218.400	85.600	3.150	1 488.000	1 264.000	92 080.000	8.600	25 720.000	31.000
指标	C_{61}	C_{62}	C_{71}	C_{72}	C_{73}	C_{74}	C_{75}	C_{76}		
城关区	82.050	28.950	1 270.055	7 709.000	400 518.000	438.000	85.360	76.470		
七里河区	55.200	17.030	1 247.305	6 141.000	210 098.000	231.000	71.050	66.320		
西固区	48.970	11.750	566.395	6 338.000	124 664.000	144.000	68.360	63.100		
安宁区	36.440	11.250	362.895	5 370.000	117 027.000	96.000	66.070	60.560		
红古区	32.320	7.260	854.675	4 657.000	52 393.000	54.000	56.320	41.180		

表 4 兰州市 5 个中心城区统计数据的无量纲化处理
Table 4 Dimensionless of statistical data of five central urban districts of Lanzhou

指标	C_{11}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{24}	C_{25}	C_{26}	C_{31}	C_{32}	C_{33}
城关区	1.000	0.991	0.075	1.000	0.484	0.239	1.000	0.618	0.000	0.000
七里河区	1.000	0.836	0.900	0.230	0.574	0.586	0.792	0.294	0.511	0.562
西固区	1.000	0.873	0.275	0.162	0.660	0.680	0.765	0.324	0.578	0.714
安宁区	1.000	1.000	0.000	0.544	0.769	0.728	0.665	0.824	0.822	0.774
红古区	0.750	0.782	1.000	0.042	1.000	1.000	0.646	0.000	0.867	0.893
指标	C_{34}	C_{35}	C_{41}	C_{42}	C_{43}	C_{44}	C_{51}	C_{52}	C_{53}	C_{54}
城关区	0.000	0.000	0.037	0.606	0.322	0.679	0.347	0.198	0.000	0.000
七里河区	0.562	0.562	0.041	0.622	0.244	0.756	0.286	0.302	0.215	0.275
西固区	0.714	0.714	0.050	0.638	0.000	1.000	0.000	0.500	0.087	0.557
安宁区	0.774	0.774	0.023	0.581	0.466	0.534	0.460	0.233	0.103	0.287
红古区	0.893	0.893	0.000	1.000	0.150	0.850	0.169	0.000	0.292	0.641
指标	C_{61}	C_{62}	C_{71}	C_{72}	C_{73}	C_{74}	C_{75}	C_{76}		
城关区	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		
七里河区	0.327	0.412	0.018	0.203	0.475	0.473	0.168	0.133		
西固区	0.403	0.594	0.554	0.178	0.689	0.671	0.199	0.175		
安宁区	0.556	0.611	0.714	0.303	0.708	0.781	0.226	0.208		
红古区	0.606	0.749	0.327	0.396	0.869	0.877	0.340	0.461		

整体水平还有待提高,需要加强城市的管理与建设。

为了明确各区的易损性程度,采用雷达图法来确定各个区综合易损性相对高低。根据式(9)、式(10)、表4,进行标准化处理与角度转换,绘制雷达图(图2)。根据式(11)~式(14),分别计算出各个区域雷达图的特征量(表6)。通过表6,兰州中心城市各区域地震综合易损性高低排序为红古区>安宁区>西固区>七里河区>城关

区。对比5个区域,西固、安宁与红古的老旧建筑物比重大,导致易损性压力较大;红古区的易损性最大,其生命线、社会、经济易损性皆处于较高水平,其地方状态较差;红古、安宁的工程抗震防范措施差,地方财政收入低、医疗卫生条件差、避灾减灾意识差使地方的易损性响应差。将各个区的易损性状况进行排序,从中也获得了其易损性高或低的原因,经济发展水平较高的区域

表 5 兰州中心城区地震综合易损性评价云数字特征

Table 5 Cloud characteristic for comprehensive evaluation of earthquake vulnerability in center districts of Lanzhou

总指标	数字特征	一级指标	权重	数字特征	二级指标	权重	数字特征
城市综合易损性评价	(0.554,0.210,0.088)	C ₁	0.030	(0.950,0.100,0.050)	C ₁₁	0.030	(0.950,0.100,0.050)
		C ₂	0.155	(0.626,0.278,0.103)	C ₂₁	0.021	(0.896,0.099,0.025)
					C ₂₂	0.039	(0.450,0.501,0.178)
					C ₂₃	0.018	(0.395,0.377,0.079)
					C ₂₄	0.038	(0.697,0.188,0.067)
					C ₂₅	0.025	(0.647,0.235,0.143)
					C ₂₆	0.014	(0.773,0.123,0.070)
		C ₃	0.228	(0.552,0.307,0.150)	C ₃₁	0.039	(0.412,0.310,0.070)
					C ₃₂	0.045	(0.556,0.301,0.171)
					C ₃₃	0.050	(0.588,0.308,0.165)
					C ₃₄	0.046	(0.588,0.308,0.165)
					C ₃₅	0.048	(0.588,0.308,0.165)
		C ₄	0.124	(0.491,0.086,0.042)	C ₄₁	0.018	(0.030,0.019,0.006)
					C ₄₂	0.050	(0.690,0.156,0.080)
					C ₄₃	0.038	(0.236,0.162,0.069)
					C ₄₄	0.018	(0.764,0.162,0.069)
		C ₅	0.148	(0.508,0.113,0.032)	C ₅₁	0.051	(0.252,0.168,0.051)
					C ₅₂	0.018	(0.247,0.155,0.093)
					C ₅₃	0.031	(0.139,0.114,0.009)
					C ₅₄	0.048	(0.352,0.248,0.060)
		C ₆	0.074	(0.423,0.240,0.108)	C ₆₁	0.039	(0.378,0.215,0.105)
					C ₆₂	0.035	(0.473,0.268,0.112)
		C ₇	0.241	(0.562,0.201,0.077)	C ₇₁	0.044	(0.323,0.314,0.046)
					C ₇₂	0.021	(0.216,0.134,0.064)
					C ₇₃	0.055	(0.548,0.311,0.129)
					C ₇₄	0.028	(0.560,0.325,0.123)
C ₇₅	0.049				(0.187,0.103,0.067)		
C ₇₆	0.044				(0.195,0.140,0.094)		

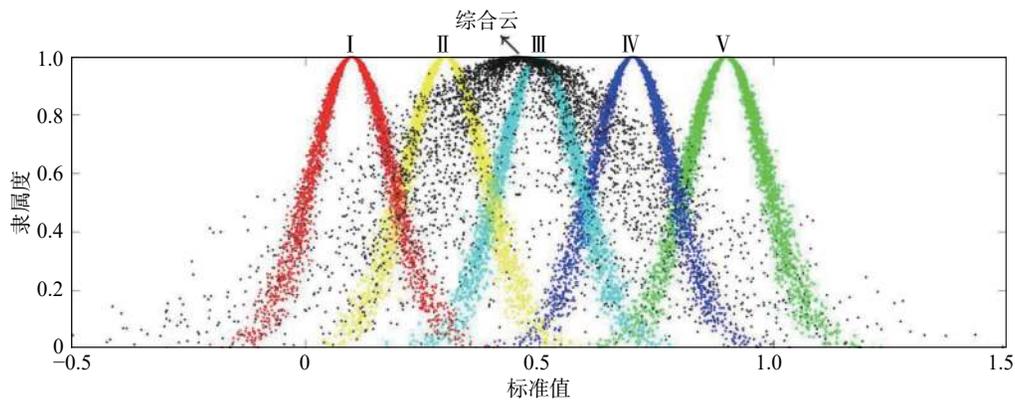


图 1 兰州中心城区综合易损性云图

Fig. 1 Comprehensive vulnerability cloud map of center districts in Lanzhou

其综合易损性较低,经济欠发达的区域其综合易损性较高。究其原因,地方政府的财政收入使得该区域有更为雄厚的社会财富和生产资源,财政收入较高的区域地方政府有更多的财力与精力用于防灾减灾建设。城市

地震综合易损性评价结果体现了城市系统在面临地震的压力、状态与响应状况,易损性越高,说明城市在地震灾害下受到危害的可能性和损失程度越大。通过进一步优化人口结构、加强城市建筑抗震规范实施、合理

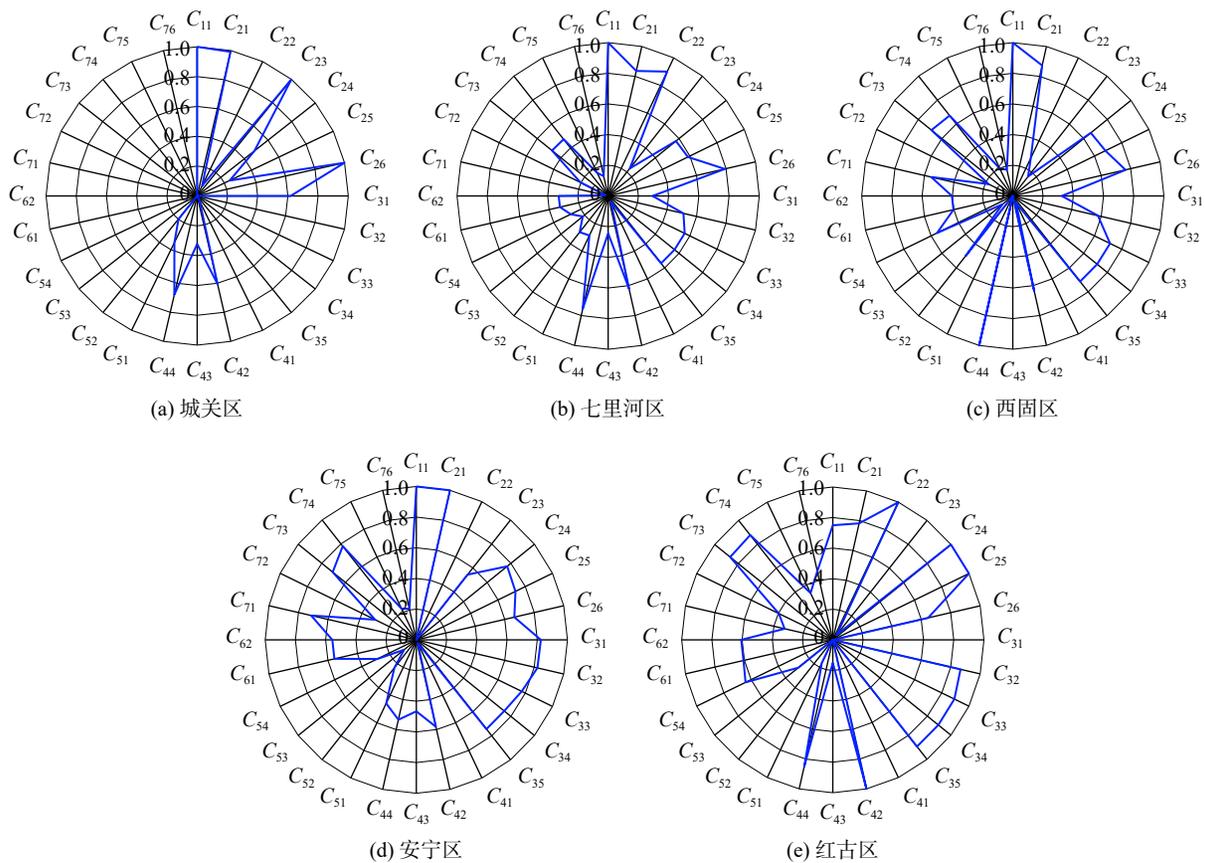


图 2 兰州中心城市各区域综合易损性雷达图

Fig. 2 Radar map of comprehensive vulnerability of various regions in central districts of Lanzhou

表 6 兰州中心城市各区域的特征量计算结果

Table 6 The calculation results of the characteristic quantity of various regions in central districts of Lanzhou

城市区	平均面积/km ²	平均周长/km	\bar{V}_x	Y_x	排序
城关区	0.370 1	7.448 6	0.083 8	0.176 1	5
七里河区	0.617 9	8.529 5	0.106 7	0.256 4	4
西固区	0.786 2	10.681 6	0.086 5	0.260 8	3
安宁区	0.932 0	8.730 3	0.153 6	0.378 1	2
红古区	1.223 4	11.430 4	0.117 6	0.379 1	1

规划城市布局、完善生命线系统的建设、提高城市的医疗卫生条件,加大力度宣传防灾减灾知识等,重点提高城市的经济发展水平,从而降低城市的地震易损性。

5 结论

(1) 以城市承灾系统为研究对象,从压力、状态、响应 3 个方面出发,建立了城市综合易损性评价指标体系,包含一级指标 7 个,二级指标 28 个。本文运用云模型结合雷达图分析法所建立的评价模型不仅可以解决城市易损性综合评价过程中的模糊性与随机性问题,也可以对城市区域易损性的相对高低进行对比,容易找出

影响城市综合易损性高低的主要因素。

(2) 基于熵权-云模型对兰州中心城区进行易损性综合评价,结果表明:兰州中心城区的地震综合易损性等级偏向Ⅲ级,易损状况中等,勉强满足城市承受震害能力的要求,但整体水平还有待提高;运用雷达图分析法将研究区域进行易损性高低排序,结果表明经济水平较高的城关、七里河区的易损性程度较低,通过重点提高城市的经济发展水平,加强城市建筑抗震规范实施、合理规划城市布局、完善生命线系统的建设等,从而降低城市的地震易损性。

参考文献 (References) :

[1] 孙龙飞. 城市地震灾害损失评估方法及系统开发研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016. [SUN Longfei. Research on the earthquake disaster loss assessment method for urban areas and system development [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)]

[2] DUZGUN H S B, YUCEMEN M S, KALAYCIOGLU H S, et al. An integrated earthquake vulnerability assessment framework for urban areas [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(2): 917 - 947.

- [3] PASTICIER L, AMADIO C, FRAGIACOMO M. Non-linear seismic analysis and vulnerability evaluation of a masonry building by means of the SAP2000 V.10 code [J] . *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(3): 467 - 485.
- [4] 苏亮, 刘畅, 蒋亦庞. 基于模糊相似理论的地震易损性分析方法 [J] . *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(8): 74 - 80. [SU Liang, XIANG Chang, JIANG Yipang. New earthquake loss assessment methodology based on fuzzy similarity theory [J] . *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(8): 74 - 80. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 臧石磊, 冯石, 李玉森, 等. 基于模糊综合评判法的辽宁省老旧砌体房屋震害预测 [J] . *地震研究*, 2019, 42(2): 166 - 171. [ZANG Shilei, FENG Shi, LI Yusen, et al. Seismic damage prediction of old masonry buildings in Liaoning Province based on fuzzy comprehensive evaluation method [J] . *Journal of Seismological Research*, 2019, 42(2): 166 - 171. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 毕可为. 群体建筑的易损性分析和地震损失快速评估[D]. 大连: 大连理工大学, 2009. [BI Kewei. Vulnerability analysis of group buildings and earthquake loss fast estimation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 刘德玉, 贾贵义, 李松, 等. 地形因素对白龙江流域甘肃段泥石流灾害的影响及权重分析 [J] . *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 33 - 39. [LIU Deyu, JIA Guiyi, LI Song, et al. Impacts of topographical factors on debris flows and weight analysis at the Gansu segment of the Bailongjiang River Basin [J] . *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 33 - 39. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 黄仁东, 吴寒, 张惕, 等. 基于云模型的岩溶隧道涌水灾害危险性评价及其在青岩头隧道的应用 [J] . *中国地质灾害与防治学报*, 2018, 29(5): 44 - 51. [HUANG Rendong, WU Han, ZHANG Ti, et al. Evaluation of water burst hazard in karst tunnel based on cloud model and its application in Qingyantou Tunnel [J] . *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2018, 29(5): 44 - 51. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 尹之潜. 城市地震危害性分析的基本框架和方法 [J] . *地震工程与工程振动*, 1999, 19(1): 70 - 75. [YIN Zhiqian. Basic framework of urban earthquake risk analysis [J] . *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1999, 19(1): 70 - 75. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 叶清. 地震危险性、地震危害性和地震易损性 [J] . *福建地震*, 2003(2): 38 - 40. [YE Qing. Seismic risk, seismic hazard and seismic friability [J] . *Fujian Seismology*, 2003(2): 38 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 刘雅玲, 罗雅谦, 张文静, 等. 基于压力—状态—响应模型的城市水资源承载力评价指标体系构建研究 [J] . *环境污染与防治*, 2016, 38(5): 100 - 104. [LIU Yaling, LUO Yaqian, ZHANG Wenjing, et al. The construction of urban water resources carrying capacity evaluation system based on PSR model [J] . *Environmental Pollution & Control*, 2016, 38(5): 100 - 104. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. [CHEN Danyu. Urban resilience assessment based on pressure-state- response model[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 李琳, 王俊杰. 四川省城市地震灾害脆弱性综合评价研究 [J] . *震灾防御技术*, 2018, 13(4): 968 - 977. [LI Lin, WANG Junjie. Comprehensive evaluation of urban earthquake disaster vulnerability in Sichuan Province [J] . *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2018, 13(4): 968 - 977. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 蒋汝成, 顾世祥. 熵权法-正态云模型在云南省水生态承载力评价中的应用 [J] . *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 118 - 123. [JIANG Rucheng, GU Shixiang. Application of entropy weight-normal cloud model in carrying capacity evaluation of water ecological environment in Yunnan Province [J] . *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2018, 29(3): 118 - 123. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨光, 刘敦文, 褚夫蛟, 等. 基于云模型的隧道塌方风险等级评价 [J] . *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(6): 95 - 101. [YANG Guang, LIU Dunwen, CHU Fujiao, et al. Evaluation on risk grade of tunnel collapse based on cloud model [J] . *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(6): 95 - 101. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 邓禄军, 夏锦慧, 卢扬, 等. 雷达图分析法在马铃薯品种特征综合评价中的应用 [J] . *贵州农业科学*, 2013, 41(7): 59 - 62. [DENG Lujun, XIA Jinhui, LU Yang, et al. Application of radar chart method in comprehensive evaluation on varietal characteristics of potato [J] . *Guizhou Agricultural Sciences*, 2013, 41(7): 59 - 62. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 中华人民共和国建设部、国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2001[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]