

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20230510002

地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性评价*

樊燕燕¹, 吕昱颖¹, 李子奇¹, 冯莉^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 城市系统是一个复杂巨系统, 对其进行地震灾害视角下的韧性评价是评估城市系统防震减灾能力及城镇可持续发展发展的关键。根据城市系统在地震灾害发生全过程中的不同表现, 从抵抗能力、应对能力、恢复能力以及适应能力四方面构建地震灾害视角下城市韧性评价指标体系。为解决评价指标赋权过程中的主观性及评价指标体系存在的复杂性等问题, 引入投影寻踪法对评价指标数据结构进行分析, 寻找出最佳投影方向, 以确定评价指标权重, 结合物元可拓模型, 计算各指标关联度及各城市综合关联度, 根据最大关联度原则确定地震灾害视角下城市韧性的评价等级。以四川省活动地震带区域7个城市3个州为例, 验证该方法的合理性与可行性。结果表明: 自贡市、雅安市、凉山彝族自治州为一般韧性城市; 德阳市、绵阳市为较高韧性城市; 泸州市、内江市、宜宾市为基本韧性城市; 阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州为较低韧性城市。研究结果可为城市抗震韧性评价研究提供参考, 为城乡规划建设的可持续发展提供思路。

关键词: 地震灾害视角; 活动地震带区域; 城市韧性评价; 投影寻踪法; 物元可拓模型

中图分类号: X915.5 **文献标识码:** **文章编号:** 1672-2132(2024)06-1323-13

Evaluation of Urban Resilience in Sichuan Seismic Belt from the Perspective of Earthquake Disaster

FAN Yanyan¹, LYU Yuying¹, LI Ziqi¹, FENG Li^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The urban system is a complex giant system, and its resilience evaluation from the perspective of earthquake disaster is crucial for evaluating the earthquake prevention and disaster mitigation capability of urban system and the sustainable development of urban and rural areas. Based on the different performance of urban system throughout the entire process of earthquake disaster, the evaluation indicator system of urban resilience from the perspective of earthquake disaster is constructed from four aspects: resistance, response, recovery and adaptability. To address the issues of subjectivity in the weighting of evaluation indicators and the complexity in the evaluation indicator system, the projection pursuit method is introduced to analyze the data structure of the indicators, to identify the optimal projection direction for determining their weights. Combined with the matter-element extension model, the correlation degrees of indicators and the comprehensive correlation degrees of cities are cal-

* 收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-07-07

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

通信作者: 吕昱颖(1997—), 女, 硕士研究生。主要从事城市系统抗震韧性研究。E-mail: 1017321687@qq.com

culated. The evaluation grades of urban resilience from the perspective of earthquake disaster were determined according to the principle of maximum correlation degree. Taking 7 cities and 3 prefectures in the active seismic belt of Sichuan Province as examples, the rationality and feasibility of the method are verified. The results show that Zigong City, Ya'an City and Liangshan Yi Autonomous Prefecture are generally resilient cities; Deyang City and Mianyang City are higher resilient cities; Luzhou City, Neijiang City and Yibin City are basic resilient cities; Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture and Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture are siliant. The research results can provide refer-ence for the evaluation of urban seismic resilience and offer insights for the sustainable development of urban and rural planning and construction.

Keywords: earthquake disaster perspective; active seismic belt area; urban resilience evaluation; projection pursuit method; matter-element extension model

0 引 言

随着城镇化的飞速发展,城市建设规模、经济效益不断扩大,城市呈现出多样性、层级性、复杂性等特点,与此同时,城市面临的危险因素不断增加,城市脆弱性逐渐凸显。其中地震作为一种破坏性强、分布广、预警时间短的突发性自然灾害,一旦发生就可能使得整个城市系统受到破坏,造成难以估量的损失,且其造成的影响在短时间内很难完全消除,故对地震灾害视角下的城市系统研究不能仅限于灾前预防,同时还需要考虑灾后恢复及响应。

目前国内外学者针对地震灾害视角下的城市韧性研究已取得一定成果,主要有三类^[1],第一类是针对城市社区,根据社区当前建设情况进行评价,从而提出具有针对性的改进措施,提高城市社区韧性,如2021年S. Marasco等^[2]充分考虑到社区各系统之间相互依赖的关系,运用Python软件对地震灾害发生后各系统功能进行模拟,提出了一个能实时仿真和可视化的社区抗震韧性评估平台。2022年,M. Hossein等^[3]提出一种结合了社区抗震韧性的特性与维度的整体评估方法,构建出社区抗震韧性指标体系,用以评估马什哈德13个副城区的社区抗震韧性能力。第二类是针对城市单一子系统,如2019年尚庆学等^[4]根据医疗系统的组成结构构建出城市医疗系统的安全韧性评估框架,运用层次分析法进行权重确定、专家打分法确定与地震救灾功能及全部功能恢复相对应的时间需求,实现地震灾害情境下城市医疗系统安全韧性评估;2020年A. Izadi等^[5]通过引入资产的韧性评估法到供水管网管理中,得出了遗憾成本、断水时间、恢复率、渐变率及水力关

键指标等5个韧性评估指标。第三类是针对省、地区所有城市,该类研究对城市所有系统进行综合考虑,从而建立起具有普遍适用性的评价指标。2020年王皓^[6]根据城市系统组成维度构建出云南省抗震情境下的评价指标体系,运用熵权法及TOPSIS法对云南省进行抗震韧性评价研究;2022年樊燕燕等^[7]从抗灾因素、承灾因素及恢复因素三个方面入手构建出抗震韧性评价指标体系,运用G1赋权法与CRITIC赋权法相结合进行指标权重的确定,结合灰云模型实现西北地区城市抗震韧性评价研究。

综上所述,现有研究多是针对城市构成单元、城市某单一子系统,或以地理划分的区域内城市群为研究对象分析其在地震灾害视角下的韧性水平。但城市作为一个复杂系统,仅仅是对其某些基本构成单元或子系统进行分析,容易缺乏综合性和协调性,且地震灾害作为一种综合性灾害,一旦发生,不仅会造成严重的人员伤亡和经济损失,同时会导致整个城市系统瘫痪。另外,在评价方法上,现有研究多运用层次分析法、G1赋权法、TOPSIS法等进行权重确定,这些方法主观性较强,且易受到两级数值的影响,易使其结果出现偏差。此外,由文献[8]可知,处于地震带的区域并不完全处在活跃断层中,通常是处在活跃断层的区域才是地震发生频繁的区域,该区域内的城市反复受地震灾害影响,故选取活动地震带区域内的城市作为主要研究对象进行城市韧性评价研究,研究结果可为类似城市抗震韧性评价研究提供参考,为城乡规划建设可持续发展提供思路。

因此,选择以四川省活动地震带区域的城市为例,运用投影寻踪法对评价指标的数据结构进行分析,通过构造投影指标函数求得评价指标的最佳投

影方向,得到各评价指标的相对重要程度,以确定评价指标权重,避免了评价指标权重确定的主观性,使得评价结果客观准确。同时,物元可拓模型具有较强的系统性,能够综合评价层次结构复杂且影响因素多的评价指标体系,选用该方法进行地震灾害视角下城市韧性评价研究具有较好的适用性。

1 基本理论

1.1 城市系统及其子系统

城市作为一个复杂的巨系统,它由经济系统、生态系统、社会系统、基础设施系统、应急系统等多个子系统相互交织而形成。其中,经济系统对城市韧性建设至关重要,良好的经济结构可以在灾后调节、缓解和消除灾害扰动的直接冲击,同时可通过补贴、赔偿等方式减低灾害损失影响的扩大。生态系统由影响人类生存与发展的水、土地、生物资源以及气候资源构成,包括自然生态系统和人为生态系统,它在很大程度上影响着城市稳定性。社会系统主要包括人口构成系统和文化构成系统等,复杂的人口结构及文化构成通常会影晌城市灾时应对和灾后恢复能力。基础设施系统,又称“生命线系统”,包括通讯、交通、供水、供电、医疗等设施及保障系统,该系统破坏后,会造成其自身结构损坏且影响其功能使用。应急系统,分为应急保障系统和应急服务系统,即地震发生后,部分城市系统受到破坏,仍有备用系统或设备进行替换或使用,保证城市系统正常运行。

1.2 地震灾害视角下城市韧性的概念

由于国内对城市韧性的研究起步较晚,成果较少且多集中于城市韧性、海绵城市等方面,对地震灾害视角下的城市韧性研究较少,故对地震灾害视角下的城市韧性的具体含义没有统一明确的定义。翟长海等^[9]通过整理总结国内外研究成果,将地震灾害视角下的城市韧性定义为:城市系统在地震的影响下能维持或迅速恢复其功能的能力。之后,杨静等^[10]对该定义进行补充,将其定义为:通过震前采用多种措施来增强城市减震防灾的能力,使得城市系统在遇到突发事件时或地震后,其功能和社会经济发展不间断或快速恢复。这两种定义考虑了地震发生过程中城市的稳定性或恢复能力,而城市系统作为地震灾害的主要受灾体,其在地震发生期

间应当具有抵抗、应对、恢复及灾前预防能力和灾后学习等能力。因此,本文参考前辈学者的相关文献,将地震灾害视角下的城市韧性定义为:受到地震扰动时,城市系统及其子系统能够抵抗且积极应对扰动,并通过学习适应恢复至最初状态,甚至达到更好的稳定状态。

2 地震灾害视角下城市韧性评价指标体系的建立

2.1 地震灾害视角下城市韧性评价指标

四川省活动地震带区域气候复杂多样,夏季多雨潮湿,地震发生时易发生细菌传染,导致传染病流行,严重影响救援进度。省内活动地震带区域多是山地、丘陵及高原,地貌地形复杂多样,震后常引发滑坡、崩塌及泥石流等次生灾害,自然灾害地频繁发生,严重影响其经济发展^[11]。此外,四川省活动地震带区域多数城市属于多民族聚集地,不同文化的差异,区域内群众对地震灾害的认识情况与应对办法也相应存在偏差,地震发生时,会存在一些难以沟通的问题。因此,在建立指标体系时,应考虑到这些因素的影响。

由于城市系统是一个复杂巨系统,进行地震灾害视角下的城市韧性评价研究的过程涉及多要素且呈现多特征,指标选取的准确、全面与否,直接影响评价结果的客观性和准确性。地震灾害发生的全寿命周期包括震前、震中和震后,在地震灾害发生的整个过程中城市系统及其子系统表现出了不同的响应过程,如图1所示。

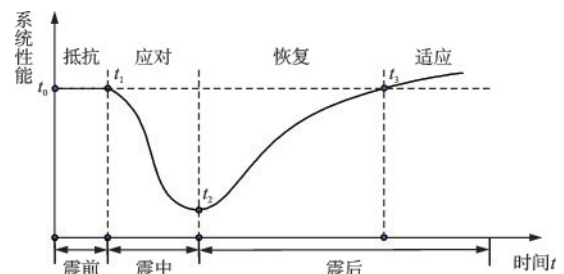


图1 地震灾害视角下城市韧性反应过程

Fig.1 Urban resilience response process from the perspective of earthquake disaster

$t_0 \sim t_1$ 为震前阶段:从 t_0 时刻到 t_1 时刻城市系统及其子系统保持稳定,系统功能完整,能抵抗包括地震发生瞬间前的一切扰动,维持系统正常运行。

城市系统抵抗外界干扰的过程体现了城市系统及其子系统的稳定性,稳定性越好,城市受灾的影响越小,且越易应对和恢复。影响城市系统稳定性主要有两个方面,第一,生态系统的稳定性。其中包括人为生态系统和自然生态系统。如人均公园绿地面积、森林利用率、地形地貌等通常会影响到城市水土的稳定性,不稳定的水土和地质环境易造成如塌陷、崩塌、滑坡之类的次生灾害。第二,基础设施系统的稳定性,如供水管网密度、燃气管网密度、抗震建筑结构占比等,这些基础设施的建设程度及抗震强度,直接影响着居民正常生活的稳定程度。

$t_1 \sim t_2$ 为震中阶段:从 t_1 时刻开始,城市系统受到地震冲击,此时城市部分系统受到破坏,其功能减退,城市防灾系统及社会组织针对地震灾害发生情况快速应对,及时展开救援工作,到 t_2 时刻城市系统由下降状态转为一种平衡状态。故这一过程主要体现了城市系统的应对能力,通过政府各部门采取的应急救援措施、受灾群众展开的应对行动以及医疗救援能力进行体现。同时,为保障城市功能在部分系统损坏的情况下仍正常运行,需存在备用系统进行替换或使用,使城市系统具有一定的冗余性。备用系统包括应急保障设施系统和应急服务设施系统,可通过应急供电量、应急水量、应急救援物资指标等进行体现。

t_2 时刻之后为震后阶段:从 t_2 时刻开始,政府部门通过采取经济补偿或定点帮扶等方式进行灾后恢复重建工作,在 t_3 时刻城市系统逐渐恢复到震前水平,从 $t_2 \sim t_3$ 时刻主要表现为恢复过程,该过程的效率主要体现了社会、经济基础的建设程度,选用居民人均可支配收入、人均地方公共预算收入、城镇居民医疗保险参保率等指标进行恢复方面的评价;从 t_3 时刻开始,通过对地震灾害经验的总结与学习,进一步提升城市系统及其子系统防灾减灾能力,达到新的更好的平衡状态,这一过程主要体现了城市系统的适应能力。适应能力体现城市系统从地震灾害经验中不断学习并提高防灾减灾能力的过程,主要通过提高受灾群众防范意识、加强对地震预警信息服务平台的建设与完善等,以提升城市系统的适应性。

综上所述,地震灾害视角下的城市韧性涵盖了地震发生全过程,表明地震灾害视角下的城市韧性是一个“过程描述”,因此通过对城市韧性的过程描述建立地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧

性的评价框架,如图2所示。同时选取城市韧性在地震灾害发生的不同阶段反映出的不同能力建立指标体系,即分别从抵抗能力、应对能力、恢复能力、适应能力进行指标体系的建立,指标体系见表1。表1中“+”表示为正向指标,值越大越好;“-”表示为负向指标,值越小越好。指标 B_3 、 B_8 、 B_9 、 $B_{11} \sim B_{15}$ 、 $B_{22} \sim B_{23}$ 、 $B_{25} \sim B_{28}$ 以城镇常住人口为基数计算,指标 $B_{32} \sim B_{34}$ 以城镇常住人口家庭为基数计算。

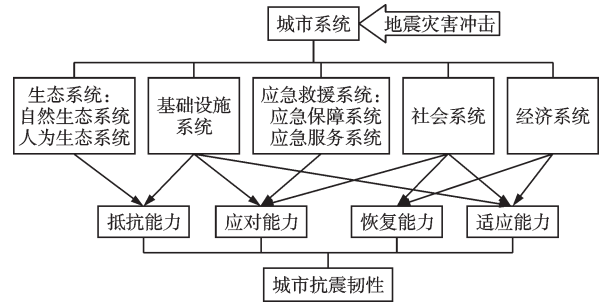


图2 地震灾害视角下城市韧性评价框架

Fig.2 Urban resilience evaluation framework from the perspective of earthquake disaster

2.2 韧性等级的划分

本文参考文献[7],结合《安全韧性城市评价指南》^[12](GB/T 40947-2021)、《建(构)筑物与应急设施地震安全韧性建设指南》^[13](DB11/T 1891—2021)以及《城市工程系统抗震韧性评价导则》^[14](RISN-TG042-2022)将地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性等级划分为四个等级,具体见表2。

3 地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性评价模型

3.1 权重确定方法

3.1.1 投影寻踪法

投影寻踪法^[15]通过对评价指标的数据结构进行分析,将高维数据投影到低维子空间,利用构造出的投影指标函数找到评价指标的最佳投影方向,得到一组包含信息最多的特征数据,即各评价指标在整个指标体系的相对重要程度,从而确定出指标权重。该方法避免了评价指标权重确定的主观性,使得评价结果客观准确。其计算步骤如下:

第一步:数据预处理。由于所选的指标数据之

表1 地震灾害视角下城市韧性评价指标体系

Table 1 Urban resilience evaluation indicator system from the perspective of earthquake disaster

准则层	指标层	指标说明	指标属性
A ₁ 抵抗能力	B ₁ 林业总产值	一年内林业全部产品产生的经济效益(亿元)	+
	B ₂ 建成区绿化覆盖率	建成区绿化面积/建成区面积(%)	+
	B ₃ 人均公园绿地面积	人均拥有建成区公园绿地的面积(m ² /人)	+
	B ₄ 供水管网密度	供水管道长度与建成区面积之比(km/km ²)	-
	B ₅ 燃气管网密度	燃气管道长度与建成区面积之比(km/km ²)	-
	B ₆ 抗震建筑结构占比	2016年以后的建筑物所占比重(%)	+
	B ₇ 道路照明灯盏数	城市道路两边照明灯数量(万盏)	+
	B ₈ 人均应急避难场所面积	人均拥有应急避难场所的面积(km ² /人)	+
	B ₉ 人均城市道路面积	人均拥有城市道路面积(km ² /人)	+
	B ₁₀ 地质灾害隐患点	年末在册地质灾害隐患点数量(处)	-
A ₂ 应对能力	B ₁₁ 万人卫生机构床位数	每万人拥有的床位数(张/万人)	+
	B ₁₂ 万人医务技术人员	每万人拥有医务技术人员(人/万人)	+
	B ₁₃ 少数民族人数占比	少数民族人数所占的比重(%)	-
	B ₁₄ 人口年龄结构指数	65岁及以上和14岁以下人数所占的比重(%)	-
	B ₁₅ 受高等教育人数占比	拥有本专科及以上学历人数所占的比重(%)	+
	B ₁₆ 传染病发病率	每10万人中患传染病的人数(人/10万)	-
	B ₁₇ 应急救援人员	冗余应急救援人员数量(人)	+
	B ₁₈ 应急电量	年末冗余供电量(亿kW·h)	+
	B ₁₉ 应急水量	年末冗余储水量(万m ³)	+
	B ₂₀ 应急救援资金	用于应急抢险的冗余资金(万元)	+
B ₂₁ 应急救援设备/机具	用于应急救援抢险设备或机具的数量(台或部)	+	
A ₃ 恢复能力	B ₂₂ 居民人均可支配收入	居民可支配收入/城市常住人口总数(万元)	+
	B ₂₃ 人均地方公共预算收入	地方公共预算收入/城市常住人口总数(千元)	+
	B ₂₄ 第二三产业生产总值占比	第二、三产业总值/地区生产总值(%)	+
	B ₂₅ 城镇居民医疗保险参保率	城镇居民有医疗保险者人口数所占的比重(%)	+
	B ₂₆ 其他保险参保率	城镇居民有其他保险者人口数的比重(%)	+
	B ₂₇ 年末失业率	年末登记在册的失业人口数所占的比重(%)	-
	B ₂₈ 年末低保户人口占比	年末登记在册的低保人口数所占的比重(%)	-
A ₄ 适应能力	B ₂₉ 社区组织数目	年末城镇社区服务组织数量(个)	+
	B ₃₀ 应急知识手册发放数量	年末共发放应急知识手册的数量(万册)	+
	B ₃₁ 地震疏散演习人数	年末共参与地震疏散演习的人数(万人)	+
	B ₃₂ 有线广播电视普及率	拥有有线广播电视的家庭数所占的比重(%)	+
	B ₃₃ 移动电话普及率	每百户中拥有移动电话的数量(部/百户)	+
	B ₃₄ 固定宽带家庭普及率	接入固定宽带的家庭数所占的比重(%)	+
	B ₃₅ 防灾减灾支出	年末地震服务支出的费用(亿元)	+
	B ₃₆ 预警信息服务平台及终端	年末地震预警信息服务平台及终端数目(套)	+

表2 地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性评价等级

Table 2 Urban resilience evaluation grades in Sichuan seismic belt from the perspective of earthquake disaster

韧性等级	等级名称	等级描述
I级	较低韧性	城市系统抵抗地震灾害的能力低,遭遇地震时造成损失大,震后救援效率低,城市恢复至安全状态时间长,适应性弱
II级	一般韧性	城市系统抵抗地震能力较低,遭遇地震时造成损失较大,震后能够开展部分救援活动,城市恢复至安全状态时间较长,适应性较弱
III级	基本韧性	城市系统具有一定抗震能力,遭遇地震时造成的损失较小,震后能够迅速开展救援活动,能在一定时间内使城市恢复至安全状态,有一定的适应性
IV级	较高韧性	城市抗震能力较好,遭遇地震时造成的损失小,震后能够快速有效地采取救援措施,能够使城市快速恢复至安全状态适应性较强

间存在量纲不同的现象,为使所选样本之间可进行相互比较,针对正向指标则用指标实际取值除以评价指标的上限值;针对负向指标则用1减去指标实际取值除以评价指标的上限值,进行规格化处理,实现无量纲化。

第二步:确定初始投影值。预先设定初始投影方向向量 $\vec{a}=\{\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_m\}$, 将 n 维 $x(i, j)(i=1, \dots, n; j=1, \dots, m)$ 进行一维投影, 得到投影值 $z(i)$, 公式如下:

$$z(i)=\sum_{j=1}^m \vec{a}(j)x(i, j) \quad (i=1, \dots, n) \quad (1)$$

式中, n 表示待评价城市(州)的个数; m 表示指标个数; $\vec{a}(j)$ 为单位长度向量; $x(i, j)(i=1, \dots, n; j=1, \dots, m)$ 表示第 i 个城市中第 j 个评价指标的实际值。

第三步:构建投影指标函数 $Q(a)$, 其目的是使指标对象的投影值满足一定的分布要求, 即局部投影点尽可能绕某个点集中分布; 整体投影点尽量分散分布。投影计算公式如下:

$$Q(a)=S_z D_z \quad (2)$$

$$S_z=\left(\frac{\sum_{i=1}^n (z(i)-\bar{z})^2}{n-1}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$D_z=\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R-r_{ij})f(R-r_{ij}) \quad (4)$$

式中, S_z, D_z 分别表示 $z(i)$ 的标准差及局部密度; R 为根据实际分布情况确定局部密度窗口半径, 通常取 $0.1S_z$; r_{ij} 表示综合特征值 z_i 与 z_j 之间的距离, $r_{ij}=|z_i-z_j| (i, j=1, 2, \dots, n)$; $f(R-r_{ij})$ 表示阶跃函数, 当 $(R-r_{ij})\geq 0$ 时, $f(R-r_{ij})=1$, 当 $(R-r_{ij})< 0$ 时, $f(R-r_{ij})=0$ 。

第四步:变换投影方向对指标进行优化, 直到投影指标值或投影图像满足要求为止, 即满足以下公式:

$$\max Q(a)=S_z D_z \quad (5)$$

$$s.t. \sum_{j=1}^m \vec{a}^2(j)=1, \vec{a}(j)\geq 0 \quad (6)$$

式中, $s.t.$ 表示约束条件。由于公式(5)是一个以 $\vec{a}(j), j=1, \dots, m$ 为优化变量的复杂非线性优化公式, 用常规方式很难求解, 需通过计算机工具进行计算, 本文选择运用模拟退火算法进行优化。

第五步:确定投影方向 $\vec{a}(best)=(\vec{a}'_1, \dots, \vec{a}'_m)$ 。若符合步骤(5)~(6)的约束, 确定该投影方向为最

佳投影方向, 若不符合, 则重复上述步骤调整投影方向, 优化投影指标直到满足要求。

第六步:确定权重。即 $w_i=\vec{a}^2(best)=(\vec{a}'_1{}^2, \dots, \vec{a}'_m{}^2)$ 。

3.1.2 模拟退火算法

模拟退火算法^[16]是一种基于 Monte Carlo 迭代求解策略的全局优化方法, 通过模拟固体物质退火过程, 经过多次迭代计算寻找出最优解, 同时该方法利用概率突跳的特性在解空间寻解, 避免了算法陷入局部最优解的困境。其主要计算过程为: (1)随机产生初始最佳投影方向向量, 计算目标函数值 $Q(a)$, 作为当前最优解; (2)设置初始温度: $T=100$; (3)设置循环计数器初始值: $L=1$; (4)开始迭代, 利用随机变化产生新的投影方向向量, 并计算其目标函数值 $Q'(a)$, 及其增量 $D=Q'(a)-Q(a)$; (5)当 $\Delta>0$ 时, 接受这一新解, 当 $\Delta\leq 0$ 时, 按一定概率 p 接受新解, 即通过 $p=\exp(-\frac{\Delta}{T})$ 选取新解; (6)若 L 小于终止步数, 则 $L=L+1$, 跳回过程(4); 当温度小于 T 时, 跳回过程(3); 当温度为终止温度 $t(t=0.001)$ 时, 直接输出当前结果。

3.2 物元可拓评价模型

物元可拓评价模型^[17]是一种多指标综合评价的方法, 将实变函数中的距离概念拓展为距的概念, 把评价指标由单一确定值转变为区间值, 从而全面评价研究对象属于集合的程度。城市系统作为一个复杂巨系统, 在进行地震灾害视角下的城市韧性评价分析时需要选取多个指标综合评价, 同时, 评价结果需要从计算结果所对应的评价等级集合中得到, 故地震灾害视角下的城市韧性评价过程与物元可拓评价模型计算过程相契合。因此, 选择运用物元可拓模型进行地震灾害视角下四川省城市韧性评价研究, 同时由于所选指标不一定有标准的划分区间, 物元可拓理论则可以根据实际情况进行调整, 以确定其经典域和节域区间。物元可拓评价模型的主要步骤有:描述物元;构造物元矩阵;关联度函数;计算关联度。具体过程详见文献[18]。

3.3 地震灾害视角下城市韧性等级评定

(1)确定待评价城市(州)对于各韧性等级 k 的综合关联度为:

$$K_k(N) = \sum_{i=1}^n w_i K'_k(x(i,j)) \quad (7)$$

$$K'_k(x(i,j)) = \begin{cases} \frac{-D_{ji}}{|a_{jk} - b_{jk}|}, & x(i,j) \in [a_{jk}, b_{jk}] \\ \frac{D_{ji}}{D_{pi} - D_{ji}}, & x(i,j) \notin [a_{jk}, b_{jk}] \end{cases} \quad (8)$$

$$D_{ji} = \left| x(i,j) - \frac{a_{jk} + b_{jk}}{2} \right| - \frac{(b_{jk} - a_{jk})}{2} \quad (9)$$

$$D_{pi} = \left| x(i,j) - \frac{a_{pk} + b_{pk}}{2} \right| - \frac{(b_{pk} - a_{pk})}{2} \quad (10)$$

式中, $K_k(N)$ 表示待评价城市 N 关于第 k 个韧性等级的关联度, ($k=1, 2, 3, 4$); $K'_k(x(i,j))$ 表示待评价城市各指标实际值 $x(i,j)$ 关于 k 等级的关联度; w_i 表示指标权重; D_{ji} 表示 $x(i,j)$ 到区间 $[a_{jk}, b_{jk}]$ 的距; D_{pi} 表示 $x(i,j)$ 到区间 $[a_{pk}, b_{pk}]$ 的距; a_{jk} 表示指标 j 在第 k 等级取值范围的下限值; b_{jk} 表示指标 j 在第 k 等级取值范围的上限值; a_{pk} 表示指标 j 取值范围的下限值; b_{pk} 表示指标 j 取值范围的上限值。

(2) 城市韧性等级评定

取 $\max\{K_k(N)\}$ 为待评价城市 N 的韧性等级, 表示为第 k 级。

4 实例应用

4.1 实例背景

四川省位于我国西南地区内陆, 是我国地震灾害影响较为严重的省份之一, 境内含多条地震带, 根据文献[19-21], 四川省近几年地震发生最为强烈且频繁的地区主要集中在川东南地震集中活跃区、龙门山断裂带沿带活跃区、川滇菱形地块东边界以及川北区域(巴彦喀拉块体内)活跃区, 且近些年平均每年有至少一次6级以上地震都发生在以上区域, 以上活动地震带区域内的断裂带均处于全新世断层, 其断层极为活跃, 且活动地震带区域内的城市受地震灾害的影响最为突出, 故本文选取上述区域内的7个城市和3个自治州进行地震灾害视角下的城市韧性评价研究, 即自贡市、泸州市、德阳市、绵阳市、内江市、宜宾市、雅安市、阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州、凉山彝族自治州。

4.2 数据收集与处理

本文对所选城市及自治州的相关地震灾害视

角下城市韧性指标数据进行收集整理, 具体结果见表3。其中, $B_1 \sim B_4$ 、 $B_6 \sim B_7$ 、 $B_9 \sim B_{12}$ 、 B_{16} 、 $B_{22} \sim B_{29}$ 、 $B_{32} \sim B_{35}$ 来自四川省各市(州)2021年统计年鉴, B_5 来自2020年城市建设统计年鉴; B_8 、 $B_{17} \sim B_{18}$ 、 $B_{20} \sim B_{21}$ 、 $B_{30} \sim B_{31}$ 、 B_{36} 来自四川省各市(州)应急管理处, $B_{13} \sim B_{15}$ 来自第七次人口普查数据, B_{19} 来自四川省水利厅水资源处。

4.3 指标权重计算

指标权重计算时, 先将各指标实际值进行规格化处理, 再运用 Matlab 软件按照 3.1 节权重确定方法进行计算, 其计算结果见表4和表5。

通过表4可知, 抵抗能力 A_1 的权重最大, 应对能力 A_2 次之, 适应能力 A_4 的权重略高于恢复能力 A_3 权重, 因此需重点关注城市基础设施系统和生态系统的建设。通过表5可知, 抗震建筑结构占比 B_6 、地质灾害隐患点 B_{10} 、应急救援资金 B_{20} 及人均地方公共预算收入 B_{23} 这4个评价指标权重最大, 分别为 0.037 8、0.038 2、0.037 4、0.039 1。抗震建筑结构占比代表处于安全性较强的建筑结构的情况, 抗震建筑结构保障了居民居住环境的安全性, 能最大程度保障居民人身安全; 地质灾害隐患点的数量决定了城市受滑坡、崩塌等地质灾害的影响程度, 地质灾害点数量越多, 城市受地质灾害影响越大; 应急救援资金代表各地用于购买应急救援物质的金额, 应急救援物资准备越充分, 应对地震灾害的能力越强; 人均地方公共预算收入表示各地财政收入情况, 该收入越高政府能用于城市系统恢复的资金越多, 恢复效率越高。故上述4个指标在地震灾害视角下城市韧性评价研究中应重点关注。

4.4 物元可拓评价模型计算

4.4.1 经典域及节域确定

本文各指标经典域的确定主要分两种, 一是参考《安全韧性城市评价指南》^[12](GB/T 40947—2021)、《建(构)筑物与应急设施地震安全韧性建设指南》^[13](DB11/T 1891—2021)确定, 如指标 B_2 、 B_6 、 B_8 、 B_{11} 、 B_{12} 、 B_{14} 、 B_{24} 、 B_{33} 、 B_{34} ; 二是采用自然断点法确定, 此经典域的划分即是各评价指标韧性等级的划分, 其结果见表6。

4.4.2 准则层及评价指标韧性等级的确定

根据 3.2 节计算出指标层与准则层的综合关联度, 确定出准则层及指标层的韧性等级, 计算结果

表3 四川省地震带区域城市韧性评价指标实际值

Table 3 Actual values of urban resilience evaluation indicators in Sichuan seismic belt

指标层	城市									
	自贡市	泸州市	德阳市	绵阳市	内江市	宜宾市	雅安市	阿坝藏族羌族自治州	甘孜藏族自治州	凉山彝族自治州
B ₁	21.7	17.7	11.5	30.7	17.1	35.6	16.6	6.5	4.7	43.4
B ₂	44.0	42.2	42.3	41.5	38.2	40.5	41.3	37.5	40.6	36.8
B ₃	14.6	14.0	14.1	14.1	16.6	14.5	19.3	14.1	10.8	10.2
B ₄	4.7	7.3	3.7	7.9	2.6	5.9	3.1	0.2	12.7	1.7
B ₅	6.756	1.584	1.958	5.314	1.731	3.687	1.160	0.042	0.020	0.149
B ₆	1.8	9.2	10.4	4.7	8.6	37.4	4.0	0.1	26.7	1.7
B ₇	5.8	7.3	6.1	11.9	7.2	8.7	2.6	0.1	0.2	3.0
B ₈	5.3	7.9	4.2	7.5	3.9	5.5	4.9	1.3	0.5	4.8
B ₉	18.3	13.7	27.1	19.5	15.4	14.1	34.6	12.6	9.2	10.6
B ₁₀	327.0	260.0	421.0	2 360.0	780.0	2 099.0	2 311.0	5 162.0	4 983.0	4 031.0
B ₁₁	52.6	35.9	42.7	43.1	41.3	33.5	29.6	27.1	15.7	18.0
B ₁₂	57.4	49.8	52.5	49.1	45.7	45.6	34.2	49.0	29.6	29.6
B ₁₃	0.5	6.1	2.0	9.2	1.8	4.7	9.2	82.5	83.0	60.4
B ₁₄	49.0	47.2	56.2	49.2	60.2	39.3	36.8	33.2	34.4	40.1
B ₁₅	19.4	16.7	30.7	38.6	23.7	18.7	20.2	31.8	33.9	18.3
B ₁₆	354.5	624.3	479.4	355.1	366.1	689.1	221.2	99.6	100.2	424.6
B ₁₇	2.6	2.8	1.6	4.5	2.2	3.1	19.5	4.5	26.2	1.9
B ₁₈	0.7	4.6	1.0	5.0	7.0	3.5	1.7	0.2	0.8	4.2
B ₁₉	4 100.0	2 900.0	20 400.0	8 100.0	2 000.0	2 400.0	0.0	400.0	0.0	1 800.0
B ₂₀	174.9	308.0	485.3	701.0	366.8	340.0	109.1	159.1	160.0	198.9
B ₂₁	2 308.0	2 336.0	1 715.0	2 331.0	1 764.0	3 904.0	2 450.0	564.0	798.0	1 050.0
B ₂₂	3.9	4.0	3.9	4.0	3.8	3.9	3.7	3.7	3.7	3.5
B ₂₃	5.2	7.0	9.9	7.3	6.2	8.5	6.4	8.4	11.7	7.4
B ₂₄	84.1	80.1	88.7	89.7	81.6	79.7	79.9	80.1	80.4	76.5
B ₂₅	98.1	98.7	98.6	99.7	99.4	97.2	98.6	98.0	98.3	97.3
B ₂₆	71.9	90.5	96.8	99.5	77.2	93.8	75.4	89.9	86.5	75.1
B ₂₇	3.7	2.7	3.4	2.7	3.8	3.3	3.9	3.8	3.3	3.2
B ₂₈	3.8	0.8	1.6	2.3	2.5	0.9	0.4	4.6	2.6	1.7
B ₂₉	317.0	387.0	383.0	276.0	369.0	319.0	115.0	68.0	72.0	225.0
B ₃₀	30.0	43.3	4.0	90.0	45.0	40.0	20.7	3.6	15.0	38.9
B ₃₁	29.5	49.3	5.6	54.4	51.2	32.8	28.0	14.0	18.2	95.3
B ₃₂	99.4	99.1	99.3	98.3	97.4	98.2	99.4	97.4	98.4	94.6
B ₃₃	222.7	224.5	292.2	332.5	289.5	226.6	215.0	256.0	265.5	227.3
B ₃₄	76.9	70.0	94.9	94.0	90.6	59.3	71.0	80.7	73.9	60.7
B ₃₅	3.9	12.2	3.6	11.0	5.2	13.4	15.1	7.3	7.3	38.4
B ₃₆	17.0	16.0	11.0	18.0	11.0	16.0	24.0	63.0	47.0	20.0

表4 准则层权重

Table 4 Weights of criterion layers

准则层	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
权重	0.303 0	0.276 5	0.203 4	0.217 1

如图3、图4所示。

4.4.3 综合韧性等级的确定

根据3.3节,可计算得出各市(州)城市韧性综合关联度及城市韧性等级,具体见表7。

表5 城市韧性评价指标权重

Table 5 Urban resilience evaluation indicator weights

指标层	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
权重	0.032 5	0.028 5	0.029 6	0.033 2	0.029 0	0.037 8	0.020 1	0.022 4	0.031 7	0.038 2	0.021 0	0.022 7
指标层	B ₁₃	B ₁₄	B ₁₅	B ₁₆	B ₁₇	B ₁₈	B ₁₉	B ₂₀	B ₂₁	B ₂₂	B ₂₃	B ₂₄
权重	0.016 7	0.023 8	0.020 8	0.020 4	0.036 5	0.022 3	0.024 6	0.037 4	0.030 3	0.036 8	0.039 1	0.031 3
指标层	B ₂₅	B ₂₆	B ₂₇	B ₂₈	B ₂₉	B ₃₀	B ₃₁	B ₃₂	B ₃₃	B ₃₄	B ₃₅	B ₃₆
权重	0.022 3	0.023 5	0.025 9	0.024 7	0.021 1	0.034 6	0.035 2	0.021 8	0.022 5	0.021 5	0.036 3	0.024 1

表6 评价指标经典域及节域

Table 6 Classical domain and joint domain of evaluation indicators

准则层	指标层	经典域				节域
		较低韧性	一般韧性	基本韧性	较高韧性	
A ₁	B ₁	[0, 12)	[12, 20)	[20, 30)	[30, 45]	[0, 45]
	B ₂	[0, 30)	[30, 35)	[35, 40)	[40, 45]	[0, 45]
	B ₃	[0, 12)	[12, 14)	[14, 16)	[16, 20]	[0, 20]
	B ₄	[8, 15]	[5, 8)	[3, 5)	[0, 3)	[0, 15]
	B ₅	[4, 7]	[2, 4)	[0.2, 2)	[0, 0.2)	[0, 7]
	B ₆	[0, 2)	[2, 7)	[7, 12)	[12, 40]	[0, 40]
	B ₇	[0, 3)	[3, 6)	[6, 9)	[9, 12]	[0, 12]
	B ₈	[0, 1)	[1, 3)	[3, 6)	[6, 9)	[0, 9]
	B ₉	[0, 13)	[13, 15)	[15, 20)	[20, 35]	[0, 35]
	B ₁₀	[3 500, 5 200]	[2 000, 3 500)	[500, 2 000)	[0, 500)	[0, 5 200]
A ₂	B ₁₁	[0, 15)	[15, 25)	[25, 35)	[35, 55]	[0, 55]
	B ₁₂	[0, 30)	[30, 40)	[40, 50)	[50, 60]	[0, 60]
	B ₁₃	[60, 85]	[40, 60)	[20, 40)	[0, 20)	[0, 85]
	B ₁₄	[30, 65]	[26, 30)	[24, 26)	[0, 24)	[0, 65]
	B ₁₅	[0, 10)	[10, 20)	[20, 30)	[30, 40]	[0, 40]
	B ₁₆	[500, 700)	[300, 500)	[100, 300)	[0, 100)	[0, 700]
	B ₁₇	[0, 2.2)	[2.2, 6.6)	[6.6, 11)	[11, 27]	[0, 27]
	B ₁₈	[0, 1)	[1, 3)	[3, 5)	[5, 7]	[0, 7]
	B ₁₉	[0, 2 000)	[2 000, 8 000)	[8 000, 15 000)	[15 000, 22 500]	[0, 22 500]
	B ₂₀	[0, 120)	[120, 320)	[320, 520)	[520, 720]	[0, 720]
	B ₂₁	[0, 400)	[400, 1 600)	[1 600, 2 800)	[2 800, 4 000]	[0, 4 000]
A ₃	B ₂₂	[0, 3.7)	[3.7, 3.8)	[3.8, 3.9)	[3.9, 4]	[0, 4]
	B ₂₃	[0, 6)	[6, 8)	[8, 10)	[10, 12]	[0, 12]
	B ₂₄	[0, 80)	[80, 85)	[85, 90)	[90, 100]	[0, 100]
	B ₂₅	[0, 86)	[86, 93)	[93, 99)	[99, 100]	[0, 100]
	B ₂₆	[0, 80)	[80, 90)	[90, 95)	[95, 100)	[0, 100]
	B ₂₇	[3.8, 4)	[3.4, 3.8)	[3.2, 3.4)	[0, 3.2)	[0, 4]
	B ₂₈	[3, 5)	[2, 3)	[1, 2)	[0, 1)	[0, 5]
	B ₂₉	[0, 100)	[100, 200)	[200, 300)	[300, 400]	[0, 400]
A ₄	B ₃₀	[0, 15)	[15, 35)	[35, 45)	[45, 90]	[0, 90]
	B ₃₁	[0, 20)	[20, 35)	[35, 55)	[55, 96]	[0, 96]
	B ₃₂	[0, 97)	[97, 98)	[98, 99)	[99, 100]	[0, 100]
	B ₃₃	[0, 200)	[200, 250)	[250, 300)	[300, 350]	[0, 350]
	B ₃₄	[0, 80)	[80, 90)	[90, 99)	[99, 100)	[0, 100]
	B ₃₅	[0, 6)	[6, 8)	[8, 15)	[15, 40]	[0, 40]
	B ₃₆	[0, 15)	[15, 20)	[20, 45)	[45, 65)	[0, 65]

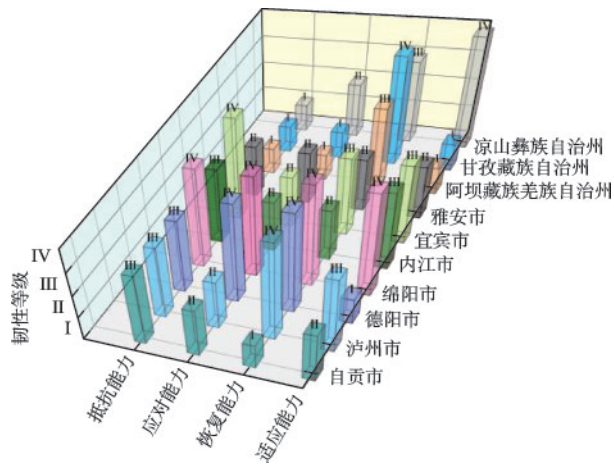


图3 各市(州)准则层韧性等级

Fig.3 Resilience grades of criterion layers for cities (prefectures)

4.5 结果分析

根据表7计算结果可知,自贡市、雅安市、凉山彝族自治州城市韧性等级为Ⅱ级,表现为一般韧性;德阳市、绵阳市城市韧性等级为Ⅳ级,表现为较高韧性;泸州市、内江市、宜宾市城市韧性等级为Ⅲ级,表现为基本韧性;阿坝藏族羌族自治州、甘孜藏族自治州城市韧性等级为Ⅰ级,表现为较低韧性。

族自冶州城市韧性等级为Ⅰ级,表现为较低韧性。由于篇幅限制,本文以自贡市为例进行具体分析。

由图3及图4计算结果可知,自贡市抵抗能力韧性等级为Ⅲ级,表现为基本韧性等级,其人均绿地面积、人均应急避难场所面积、人均城市道路面积处于基本韧性等级,表明自贡市人工生态环境建设程度较高,有充足的应急避难场所,在地震来临时具有一定抗震能力。自贡市应对能力韧性等级为Ⅱ级,表现为一般韧性,其传染病发病率、应急救援人员数量、应急水量、应急救援物资4项评价指标均处于一般韧性等级,表明自贡市应急救援能力及城市系统冗余性不高。自贡市恢复能力韧性等级为Ⅰ级,表现为较低韧性等级,此项能力中人均地方公共预算收入、其他保险参保率以及年末失业率及年末低保户人口占比均为较低韧性等级,表明自贡市社会经济发展水平不高,风险意识认识不强。自贡市适应能力韧性等级为Ⅱ级,表现为一般韧性等级,其中应急知识手册发放数量、地震疏散演习人数、移动电话普及率、互联网普及率以及地震预警信息服务平台及终端等5项评价指标处于一般韧性等级,表明自贡市在地震灾害预防措施及灾后经

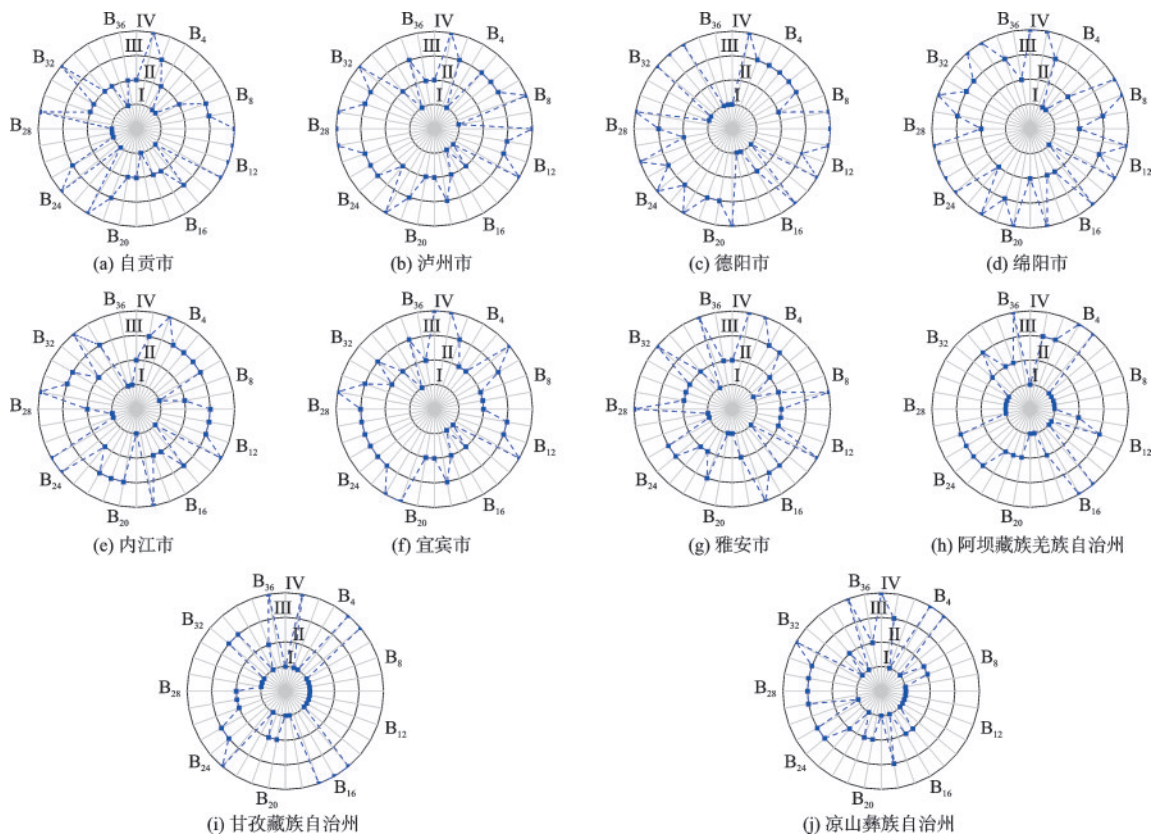


图4 各市(州)评价指标韧性等级

Fig.4 Resilience grades of evaluation indicators for cities (prefectures)

表7 各城市(州)城市韧性综合关联度

Table 7 Comprehensive correlation degrees of urban resilience of cities (prefectures)

城市	综合关联度				等级
	I级	II级	III级	IV级	
自贡市	-0.311 5	-0.253 5	-0.347 0	-0.348 8	II级
泸州市	-0.423 4	-0.270 3	-0.167 0	-0.212 8	III级
德阳市	-0.448 2	-0.476 4	-0.336 7	-0.227 9	IV级
绵阳市	-0.533 8	-0.395 0	-0.341 3	-0.175 4	IV级
内江市	-0.385 2	-0.257 2	-0.136 3	-0.285 4	III级
宜宾市	-0.434 6	-0.263 6	-0.152 7	-0.222 2	III级
雅安市	-0.368 8	-0.211 0	-0.289 1	-0.307 3	II级
阿坝藏族自治州	-0.226 3	-0.355 5	-0.413 3	-0.501 4	I级
甘孜藏族自治州	-0.243 4	-0.393 6	-0.487 8	-0.405 9	I级
凉山彝族自治州	-0.271 9	-0.202 6	-0.299 2	-0.371 3	II级

验学习总结的投入不够。

4.6 提升措施

根据4.4节计算结果及4.5节结果分析,提出以下提升措施:

(1)抵抗能力方面。首先,需要提高城市建(构)筑物结构及基础设施系统的抗震等级,加强新建项目对相关规范标准执行情况的监督,同时加大老旧小区安全隐患排查力度,加快老旧小区改造进度。针对应急避难场所面积和城市道路面积较少的问题,加强城市整体规划,健全城市交通网络。此外,加快地震活动断层排查工作进度,严格进行地质灾害隐患点排查工作,运用新技术、新方法找到高位、高度隐蔽性环境下的地质灾害隐患点,并逐一登记造册入库,实现监测预警网格全覆盖,完善防灾预案及落实各项防治措施,并定期发布防灾预案及防治措施实施情况。

(2)应对能力方面。完善救援系统,要求政府能在震后快速做出救援反应,及时提出救援方案。针对医疗资源不足问题,完善医疗服务系统,增强各级医疗服务系统的连通性,合理分配医疗资源,同时重视传染病防治,扩展传染病防治知识宣讲及普及,保障人民生命安全。此外,重视城市应急冗余系统的建设,完善基础设施拓扑结构,形成多道防线,加强应急供水系统及备用电源等的建设,同时,健全应急救援物资保障管理工作,提高救灾物资信息化管理水平,严格落实主体责任,建立健全常态经费保障机制,确保应急救援物质储备切合灾情特点。

(3)恢复能力方面。首先,增强居民对医疗保险及其他保险的认识及风险意识,实现基本医疗保险全覆盖,提高居民社会保险参保率,保障居民自身财产安全。其次,通过宣扬城市特点,吸引外来企业投资,或增加政府企业合资企业数量,形成产业多样化,增加就业岗位,提高居民个人经济收入。此外,政府针对受灾情况的严重程度,分级对受灾群众提供经济补助,保证防灾减灾资金合理化使用。

(4)适应能力方面。首先,完善通讯系统,加强通信基站建设,实现有线电视广播全覆盖,扩展移动电话普及率及互联网普及率,提高人民预警信息接收率,同时实现地震防御及应对知识普及率。其次,提高应急知识手册发放数量,扩大地震疏散演练人群,增加地震疏散演练次数。再次,及时提供震后心理疏导服务,对特殊人群进行心理安抚,减少或消除地震灾害给人民带来的心理创伤。此外,扩大地震烈度速报与地震预警项目建设范围,实现地震预警台站全省覆盖,加强地震重点预警区内各省信息互通性与协同性,专研核心技术,延长地震预警时间,争取更多救援求生机会,保障人民生命财产安全,同时,进一步丰富四川省自主研发灾情快速评估系统的数据库,提高应急救援效率。

5 结 论

(1)根据抗震防灾韧性城市的特征,结合地震灾害的过程性特点,从抵抗能力、应对能力、恢复能

力以及适应能力4方面,构建了地震灾害视角下四川省地震带区域城市韧性评价指标体系。

(2)利用投影寻踪法对各城市建设数据结构进行分析,确定指标权重,结合物元可拓法建立了地震灾害视角下城市韧性评价模型,有效解决了地震灾害视角下城市韧性评价过程中权重确定的主观性、指标间相互影响的复杂性等问题。

(3)以四川省的7个城市及3个自治州为例,选取了处于活动地震带区域且地震发生频繁的城市进行研究,确定出各城市及自治州城市韧性等级,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] 缪惠全,王乃玉,汪英俊,等.基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J].自然灾害学报,2021,30(1):10-27.
Miao H Q, Wang N Y, Wang Y J, et al. An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process[J]. Journal of Natural Disasters, 2021,30(1): 10-27. (in Chinese)

[2] Marasco S, Cardoni A, Noori A Z, et al. Integrated platform to assess seismic resilience at the community level [J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 64: 102506.

[3] Hossein M, Mahdis B. A measurement of community seismic resilience in sub-city districts of Mashhad, Iran [J]. Journal of Environmental Planning and Management, 2022,65(4):675-702.

[4] 尚庆学,李吉超,王涛.医疗系统抗震韧性评估指标体系[J].工程力学,2019,36(增1):106-110.
Shang Q X, Li J C, Wang T. Indicators system used in seismic resilience assessment of hospital system[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36 (Sup1): 106-110. (in Chinese)

[5] Izadi A, Yazdandoost F, Ranjbar R. Asset-based assessment of resiliency in water distribution networks[J]. Water Resources Management, 2020,34:1407-1422.

[6] 王皓.云南省抗震情境下城市韧性评价研究[D].昆明:云南大学,2020.
Wang H. Study on the evaluation of urban resilience under the earthquake resistant situation in Yunnan Province[D]. Kunming: Yunnan University, 2020. (in Chinese)

[7] 樊燕燕,刘轩谷.基于DSR-灰云模型的西北城市抗震韧性评估[J].防灾减灾工程学报,2022,42(6):1191-1202.
Fan Y Y, Liu X G. Seismic resilience evaluation of northwest cities based on DSR-gray cloud model [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022,42(6): 1191-1202. (in Chinese)

[8] 曹筠,李彦宝,冉勇康,等.城市隐伏活动断层避让典型案例分析——以新沂市郯庐断裂带沿线某场地为例[J].地震地质,2022,44(4):1071-1085.
Cao J, Li Y B, Ran Y K, et al. Typical case analysis on setback distance for urban buried active fault: an example site along the Tan Lu Fault Zone in Xinyi City [J]. Seismology and Geology, 2022, 44(4): 1071-1085. (in Chinese)

[9] 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 Ch 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)

[10] 杨静,李大鹏,翟长海,等.城市抗震韧性的研究现状及关键科学问题 [J]. 中国科学基金, 2019, 33 (5): 525-532.
Yang J, Li D P, zhai C H, et al. Key scientific issues in the urban earthquake resilience[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation, 2019, 33(5), 525-532. (in Chinese)

[11] 张俊良,闫东东.多维禀赋条件、地理空间溢出与区域贫困治理:以龙门山断裂带区域为例[J].中国人口科学,2016,5:35-48,126-127.
Zhang J L, Yan D D. Multi-dimensional endowment conditions, geographical spatial spillover and regional poverty governance: The case of Longmen Mountain Fault Zone[J]. Chinese Journal of Population Science, 2016, 5:35-48,126-127. (in Chinese)

[12] 安全韧性城市评价指南:GB/T 40947—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.

[13] 建(构)筑物与应急设施地震安全韧性建设指南:DB11/T 1891—2021[S].北京:北京市市场监督管理局,2021.

[14] 城市工程系统抗震韧性评价导则:RISN-TG042-2022[S].北京:中国建筑工业出版社,2022.

[15] Wei P, Lei H, Qiang F, et al. Study on agricultural drought risk assessment based on information entropy and a cluster projection pursuit model [J]. Water Resources Management, 2022,37(2):619-638.

- [16] Li S, Zhou X, Guo Q. Research on microgrid optimization based on simulated annealing particle swarm optimization[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 118:01038.
- [17] 王鹏程. 基于改进物元可拓模型的环渤海港口物流竞争力评价[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
Wang P C. Evaluation of logistics competitive-ness of bohai rim ports based on improved element extension model [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese)
- [18] 李栋学, 刘茂, 刘付衍华. 基于多层次可拓评价法的城市燃气管线风险评价研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(1):92-97.
Li D X, Liu M, Liu F Y H. Research on risk assessment of city gas pipeline with multi-level extenics [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(1):92-97. (in Chinese)
- [19] 杜方. 2019年地震活动综述[J]. 四川地震, 2020, 174(1):1-5.
Du F. Summary of earthquake activities in 2019 [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2020, 174(1):1-5. (in Chinese)
- [20] 杜方. 2020年地震活动综述[J]. 四川地震, 2021, 179(2):1-6.
Du F. Summary of earthquake activities in 2020 [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2021, 179(2):1-6. (in Chinese)
- [21] 杜方. 2021年地震活动综述[J]. 四川地震, 2022, 183(2):1-8.
Du F. Summary of earthquake activities in 2021 [J]. Earthquake Research in Sichuan, 2022, 183(2):1-8. (in Chinese)
- (本文编辑:张艺)



(上接第 1310 页)

- [16] Weng J, Tan K, Lee C. Modeling progressive collapse of 2D reinforced concrete frames subject to column removal scenario[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 126-143.
- [17] Li S, Shan S D, Zhai C H, et al. Experimental and numerical study on progressive collapse process of RC frames with full-height infill walls[J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 59: 57-68.
- [18] DoD 2016, design of buildings to resist progressive collapse (UFC 4-023-03)[S]. Washington D.C.: Department of Defense, 2016.
- [19] Wang Y, Zhang B, Gu X L, et al. Experimental and numerical investigation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering transverse beam and slab effects[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 47: 103907.
- [20] Hou J, Yang Z. Simplified models of progressive collapse response and progressive collapse-resisting capacity curve of RC beam-column substructures[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2014, 28(4): 04014008.
- [21] Yu J, Tan K H. Analytical model for the capacity of compressive arch action of reinforced concrete sub-assemblages[J]. Magazine of Concrete Research, 2014, 66(4): 109-126.
- [22] Gu X L, Zhang B, Wang Y, et al. Experimental investigation and numerical simulation on progressive collapse resistance of RC frame structures considering beam flange effects[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42: 102797.