

# 城市空间脆弱性概念、测度及其空间分异特征\*

## ——以成渝地区双城经济圈地级市为例

The Concept, Quantitative Measurement, and Spatial Differentiation of Urban Spatial Vulnerability: A Case Study of Prefecture-level Cities in the Chengdu-Chongqing Economic Circle

李云燕 汪 森 王艳红 方辰昊 苟梦涵

LI Yunyan, WANG Miao, WANG Yanhong, FANG Chenhao, GOU Menghan

**关键词** 空间脆弱性; 测度; 空间分异; 成渝地区双城经济圈

**Keywords:** urban spatial vulnerability; comprehensive measurement; spatial differentiation; Chengdu-Chongqing economic circle

**提 要** 城市脆弱性涵盖经济、社会、文化、环境、管理等诸多要素, 对其认识及量化测度面临较大困难。城市空间作为城市的物质载体, 其脆弱性直接决定城市脆弱性。基于此, 通过对城市空间脆弱性概念的重新认识, 从物质空间视角构建“暴露—敏感—适应”的综合测度体系。以成渝地区16个地级市的城市空间为研究对象, 分析其空间脆弱性分异特征及影响因素, 并提出优化策略。结果表明: 成渝地区双城经济圈城市空间脆弱性呈现“南北两极高、中间低”的空间格局, 整体处于中度脆弱状态; 雅安和达州表现出高脆弱性。复杂的城市空间形态、高建筑密度、地质灾害风险以及开敞空间不足是主要致脆因素, 并从空间维度提出相应政策建议, 为韧性城市建设提供科学指引。

**Abstract:** Urban vulnerability entails and management elements, and it is difficult to recognize and quantitatively measure it. As the material carrier of cities, the vulnerability of urban space directly determines urban vulnerability. Based on this, the concept of urban space vulnerability is re-conceptualized, and a comprehensive measurement system of "exposure-sensitivity-adaptation" is constructed from the perspective of physical space. The urban space of 16 prefectural-level cities in the Chengdu-Chongqing area is taken as the research object to analyze their spatial vulnerability differentiation characteristics and influencing factors, and put forward optimization strategies. The results show that the spatial vulnerability of cities in the Chengdu-Chongqing economic circle shows a spatial pattern of "high at the north and south poles and low in the middle", and is in a moderately fragile state; Ya'an and Dazhou show high vulnerability. Complex urban spatial patterns, high building densities, geological disaster risks, and insufficient open space are the main vulnerability-causing factors, and corresponding policy recommendations are put forward from the spatial dimension to provide scientific guidance for the construction of resilient cities.

中图分类号 TU984 文献标志码 A  
DOI 10.16361/j.upf.202502006  
文章编号 1000-3363(2025)02-0043-08

### 作者简介

李云燕, 重庆大学建筑城规学院、自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室副教授、博士生导师, liyunyan007@126.com

汪 森, 重庆大学建筑城规学院硕士研究生

王艳红, 贵州省湄潭县文化和旅游局科员

方辰昊, 重庆大学建筑城规学院山地城镇建设与新技术教育部重点实验室助理研究员

苟梦涵, 重庆大学建筑城规学院硕士研究生

\* 国家自然科学基金面上项目“城市空间形态韧性的智慧测度、适灾机理与规划响应研究”(项目编号: 52478042); 重庆市社会科学规划项目“超大城市暴雨内涝风险及其管控的长效机制研究”(项目编号: 2023NDYB83); 中央高校基本科研业务费“城乡高质量发展策略与技术研究”(项目编号: NO.2024CDJXY014)

城市空间是现代人口和产业高度集中的区域，作为一个复杂的综合系统，它不仅承载着城市物质要素，也是社会、经济和文化活动的场所。城市空间特征在很大程度上影响着城市灾害风险的大小<sup>[1]</sup>。随着工业化、城镇化的推进及极端气候变化，城市空间的格局和环境状态发生转变，其抵抗灾害的能力逐渐减弱，系统稳定性受到扰动，普遍存在脆弱性隐忧。有必要对城市空间进行体检，摸清现行健康状况，而脆弱性测度是对城市空间进行体检的有效手段<sup>[2]</sup>。

国内外学者<sup>[3-5]</sup>对城市脆弱性展开了多层次的研究，涵盖城市生态环境脆弱性、自然灾害脆弱性、社会脆弱性等内容。然而，现有研究多停留在描述城市空间脆弱性现象，较少从空间视角进行脆弱性的量化研究。城市空间脆弱性研究旨在识别和评估空间系统受到潜在威胁的程度，从被动应对脆弱性造成的损害转变为主动解决问题，通过制定空间控制措施来减轻灾害的干扰<sup>[6]</sup>。空间脆弱性测度即识别城市空间系统内易受破坏的要素，通过提升和改进这些要素来增强城市的防灾能力，帮助决策者制定更科学的政策和空间优化措施，以提高城市的抗灾能力。本文以成渝地区双城经济圈16个地级市的城市空间为研究对象，构建空间脆弱性综合测度体系，分析城市空间脆弱性的分异特征及其影响因素，最后提出脆弱性空间的优化策略，旨在为城市韧性发展及相关政策的制定提供参考和依据。

## 1 城市空间脆弱性认识

### 1.1 城市空间脆弱性概念内涵解析

学界已有研究对脆弱性的界定可归纳为两类：结构性脆弱性和胁迫性脆弱性<sup>[7]</sup>。结构性脆弱性主要由系统内部的特征决定，如系统内部结构的不稳定性和敏感性；胁迫性脆弱性则源于系统外部的压力或干扰，如人类活动和环境变化。也有学者<sup>[8]</sup>从综合视角出发，认为脆弱性是系统在面临内外扰动时的敏感性与应对能力不足的综合属性。近年来，城市空间脆弱性的研究逐渐引起学术界的关注。陈路凯<sup>[9]</sup>基于台风灾害认为，城市空间脆弱性不仅是城市空间的内部属性，

是物质空间暴露于外部扰动的可能性，也是物质空间对外部扰动的敏感性和恢复力。由此可见，学界对城市空间脆弱性的理解已逐步建立在对空间系统内部特性与外部干扰相互作用的认识之上。因此，本文认为，城市空间脆弱性是指城市空间系统对外部扰动的暴露性、敏感性以及适应能力，从而使城市空间内部结构和功能等特征发生改变的一种属性。

如图1所示，从扰动源来看，外部扰动包括地震、洪涝、泥石流等自然灾害，也包含社会、经济、文化等人类活动。外部扰动是城市空间脆弱性发生的驱动因素，空间系统的内在结构是空间脆弱性产生的直接原因。当外部扰动作用于城市空间系统时，其施加的压力打破了系统维持内部基本结构和功能的阈值，空间脆弱性就会被表现出来。城市空间脆弱性具有隐蔽性，外部扰动是空间脆弱性凸显的关键因素，对空间系统施加不同的压力，系统将表现出不同程度的脆弱性，当外部作用力无限大时，城市空间脆弱性将被全部展现，即空间系统崩溃。从城市空间系统的内在结构来看，空间脆弱性由暴露性、敏感性和适应力等三个维度构成。

### 1.2 城市空间脆弱性研究的进展及问题

国内外学者对城市空间脆弱性进行了多层次研究，在理论和方法上取得了一定成果。Pinto等<sup>[10]</sup>从城市尺度定义空间脆弱性，通过识别和整合社会空间因素，为城市灾害风险降低提供了更细致的方法；Tang等<sup>[11]</sup>利用机器学习构建洪

水情景下城市空间脆弱性时空评估框架；García-Ayllón等<sup>[12]</sup>利用地理信息系统(GIS)和空间自相关分析，评估城市空间脆弱性。张晓瑞等<sup>[13]</sup>通过分析城市“人—地”复合系统，构建了基于“非空间—空间”的城市脆弱性综合测度理论模型；陈路凯<sup>[9]</sup>从暴露性、敏感性和恢复力方面构建了城市空间脆弱性评价框架，对台风灾害下的城市空间脆弱性进行研究。此外，一些研究在脆弱性测度指标体系构建上涉及少量空间脆弱性评价因子。例如，程林<sup>[14]</sup>以城市规模、密度和形态作为敏感性维度指标，构建了大城市脆弱性评价指标体系；李彤玥<sup>[15]</sup>建立了“暴露—敏感—适应”评价模型，收集空间数据和统计数据，运用主成分分析和聚类分析方法进行城市空间脆弱性研究。

尽管目前关于城市空间脆弱性的研究已取得一定成果，但聚焦于空间视角开展的研究仍较为有限，有必要进一步深入开展基于空间视角的系统研究，以提升对城市空间脆弱性的全面理解和应对能力。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 数据来源

本研究基于城市空间脆弱性测度模型构建和指标诉求，确定研究所需的各类数据来源，见表1。

### 2.2 城市空间脆弱性综合测度流程

本文以成渝双城经济圈16个地级市为测度对象，借助层次分析法、熵值法

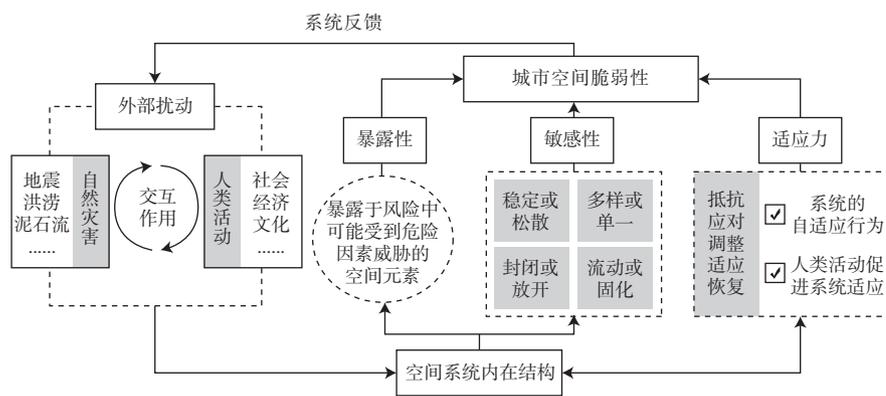


图1 城市空间脆弱性的概念内涵

Fig.1 The concept of urban space vulnerability

等分析方法，构建城市空间脆弱性综合测度模型。如图2所示，在确定城市面临的主要风险及测度的空间尺度的基础上，基于已有研究成果并结合实际情况，构建测度指标体系，采用科学的赋权方法，确定各指标的权重值。借助ArcGIS、Python等对城市空间原始数据进行处理，计算各指标数值。最终完成对成渝地区双城经济圈的城空间脆弱性的综合测度及其空间分异特征研究。

### 2.3 测度指标体系构建

遵循空间性、系统性与可操作性等原则，结合定性分析与定量分析，构建指标体系。首先，通过文献综述、理论分析和专家咨询，以研究目标为导向，明确城市空间脆弱性的影响因素和形成机制，并基于理论分析，厘清相关理论概念和内涵，利用专家咨询法初步建立城市空间脆弱性综合测度指标体系的层次结构。其次，根据文献研究、频数统计、数据可获得性和研究区空间概况，筛选出高频指标，形成指标集合，并根据研究区的具体情况对其进行筛选、补充和修订。最后，通过专家访谈对指标体系进行进一步改进和完善，确保其合理性、科学性。

确立城市空间脆弱性综合测度指标体系如表2。空间暴露性和敏感性的各个指标反映了各城市空间要素对外界干扰的敏感程度，其值越高，表明该空间要素越脆弱。空间适应力的各个指标反映了空间要素在被干扰后的自我调整、适应能力，其值越大，则空间单元的适应能力越大，脆弱性就越小<sup>[16]</sup>。

### 2.4 数据标准化与指标权重确定方法

由于测度体系中各指标的维度不一致，为消除不同量纲间的差异，把测度指标分为积极指标和消极指标，用极值标准化方法对不同量纲的原始数据进行标准化处理。数据标准化处理公式：

正向指标：

$$y_{ij} = [x_{ij} - \min(x_{ij})] / [\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})] + 0.001 \quad (1)$$

负向指标：

$$y_{ij} = [\max(x_{ij}) - x_{ij}] / [\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})] + 0.001 \quad (2)$$

式(1)和(2)中： $x_{ij}$ 、 $y_{ij}$ 分别表示指标的原始值和标准值， $\max(x_{ij})$ 表示

表1 测度指标数据来源  
Tab.1 Source of measurement index data

数据名称	来源	时间 / 年
空间人口	第七次全国人口普查、WorldPop	2020
建筑轮廓	谷歌Bigemap、国家青藏高原科学数据中心	2020
地形数据	地理空间数据云	2023
城市空间形态	全球地表覆盖数据(GlobeLand30)	2010、2020
地质灾害	中国科学院资源环境科学与数据中心	截至2020
城市交通网络	Open Street Map 开源地图	2023
POI	高德API	2023
水体数据	Open Street Map 开源地图	2023
AOI	高德API	2023
夜间灯光数据	国家地球系统科学数据中心	2022

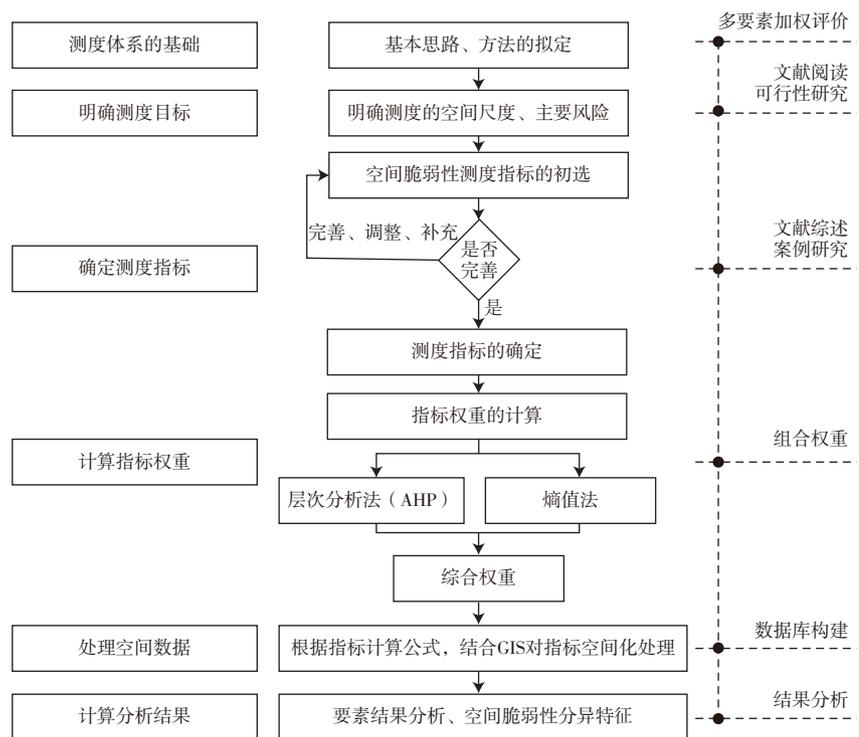


图2 城市空间脆弱性测度流程图  
Fig.2 Urban space measurement flow chart

该指标中的最大值， $\min(x_{ij})$ 表示该指标中的最小值。

科学合理地分配指标权重有利于测度结果的准确性。将层次分析法(AHP)和熵值法相结合进行权重分配，互补这两种方法的不足<sup>[17]</sup>，保证了指标权重的科学性和准确性。

### 2.5 城市空间脆弱性综合测度模型

城市空间脆弱性(SVI)被定义为空

间系统面临外部冲击或内部压力时，其空间结构、功能和组织可能出现易受损害或难以适应的程度，与暴露性(EI)和敏感性(SI)成正比，与适应力(AI)成反比。因此本文采用综合指数法对各项指标进行线性加权求和和计算，公式如下：

$$SVI = f\{EI, SI, AI\} = EI + SI + AI \quad (3)$$

式中：SVI表示城市空间脆弱性；EI表示城市空间暴露性指数；SI表示城市

空间敏感性指数；AI表示适应力指数。EI、SI、AI的计算公式如下：

$$EI = \sum_{i=1}^n F_i \times W_i \quad (4)$$

$$SI = \sum_{i=1}^n F_i \times W_i \quad (5)$$

$$AI = \sum_{i=1}^n F_i \times W_i \quad (6)$$

式(4) — (6)中： $F_i$ 为各维度指标的标准化值， $W_i$ 为各维度指标的综合

权重， $n$ 为各维度指标的数量。

### 3 结果分析

#### 3.1 城市空间脆弱性子系统测度

##### 3.1.1 城市空间暴露性测度

利用自然断点法将城市空间暴露性划分成5个等级。空间暴露性高的区域

集中在各城市空间的老城区，呈向四周逐渐递减的“辐射状”空间分布状态。如表3所示，城市空间暴露性等级在较低及以下的占比较大，说明各个城市空间规模整体处于较低状态，对城市空间发展的负向影响较小。重庆具有显著的低空间暴露性，遂宁高度暴露性面积占比最高，其次为雅安。

##### 3.1.2 城市空间敏感性测度

通过自然断点法将城市空间敏感性划分成5个等级，以此反映各城市空间敏感性分布情况。各城市空间敏感性分布差异较大，其中雅安、达州、广安明显高于其他城市。各城市空间敏感性面积占比超过20%的等级主要集中在较低、中等和较高等3种等级，整体城市空间敏感性呈中等态势(表4)。雅安的高度空间敏感性面积占比最高，其次是达州。敏感性低的城市空间以德阳和自贡两个城市为代表。

##### 3.1.3 城市空间适应力测度

通过自然断点法将城市空间适应力划分成5个等级。城市空间适应力高的区域集中在老城核心区，空间适应力大小沿老城区向四周逐渐递减。个别适应力较小的城市较突出，如绵阳、达州。各等级的城市空间适应力面积占比在20%以上的等级主要分布在较高、中、较低、低范围，整体各城市空间适应力大小偏低。内江的高度空间适应力占比最高，其余城市的高度空间适应力面积占比均在10%以下。低度空间适应力面积占比高的城市有达州、绵阳、雅安等，见表5。

表2 城市空间脆弱性综合测度指标体系

Tab.2 Comprehensive index system of urban spatial vulnerability

目标层	准则层	指标层	属性
城市空间脆弱性	暴露性	人口密度	+
		建筑密度	+
	敏感性	地形起伏度	+
		归一化水体指数	+
		分形维数	+
		城市空间扩展强度指数	+
		地质灾害易发区域面积比	+
	适应力	公共服务设施多样性	-
		城市内部交通可达性	-
		城市对外骨干交通通道数量	-
		开敞空间指数	-
		夜间灯光指数	-

表3 成渝地区双城经济圈城市空间暴露性等级统计表

Tab.3 Statistics of urban spatial exposure level of Chengdu-Chongqing economic circle

城市	空间暴露性等级占比 / %				
	低	较低	中	较高	高
重庆	78.92	15.74	6.04	0.23	0.00
成都	55.62	30.00	14.10	1.25	0.00
达州	52.86	27.08	13.16	6.40	2.81
广安	36.45	26.49	23.37	12.12	3.65
南充	59.92	20.20	8.30	6.75	5.68
遂宁	60.48	21.05	9.39	4.64	8.34
资阳	55.18	20.96	9.84	8.42	6.02
内江	38.23	30.24	17.61	9.71	6.50
自贡	32.61	28.78	27.91	12.02	0.01
宜宾	59.57	24.77	10.31	4.59	2.37
泸州	27.53	39.42	23.24	8.09	4.42
乐山	54.83	26.55	12.25	6.53	4.19
眉山	60.21	21.72	10.43	6.23	3.38
雅安	32.96	28.75	17.32	16.12	8.23
德阳	30.30	31.85	19.07	15.13	5.44
绵阳	29.06	39.52	19.08	10.45	4.86

注：灰底表格表示等级面积占比超过20%

### 3.2 成渝地区双城经济圈城市空间脆弱性分异特征分析

#### 3.2.1 总体城市空间脆弱性分异特征

城市空间脆弱性主要根据空间脆弱性程度来衡量，脆弱性越高，城市空间环境越脆弱，稳定性越低，越容易受到外部条件的干扰。采用自然断点法将城市空间脆弱性分为低、较低、中、较高、高5个不同的等级，总体城市空间的脆弱性均值为0.5134，表明成渝地区双城经济圈总体城市空间脆弱性大小一般。城市空间脆弱性最高的是雅安，其次是达州、绵阳。空间脆弱性越高，城市空间结构、形态、功能越不合理，越容易

表4 成渝地区双城经济圈城市空间敏感性等级统计表

Tab.4 Statistics of urban spatial sensitivity level of Chengdu-Chongqing economic circle

城市	空间敏感性等级占比 / %				
	低	较低	中	较高	高
重庆	0.20	50.73	36.64	11.30	1.13
成都	0.06	36.81	45.68	15.64	1.81
达州	0	12.68	27.38	36.21	23.73
广安	0	12.74	38.08	28.90	20.28
南充	0	47.19	36.05	16.08	0.67
遂宁	0	13.59	45.81	32.95	7.65
资阳	11.94	53.30	29.82	4.91	0.03
内江	1.33	70.74	21.48	6.20	0.25
自贡	34.05	47.27	15.53	2.95	0.21
宜宾	0	32.09	32.29	31.29	4.32
泸州	0	18.58	43.42	33.12	4.88
乐山	0	10.03	42.25	29.12	18.59
眉山	0.02	66.48	27.56	5.55	0.39
雅安	0	1.02	14.95	34.57	49.46
德阳	82.48	16.79	0.66	0.07	0
绵阳	3.66	51.12	31.55	12.63	1.03

注：灰底表格表示等级面积占比超过20%

表5 成渝地区双城经济圈城市空间适应力等级统计表

Tab.5 Statistics of urban spatial adaptability level of Chengdu-Chongqing economic circle

城市	空间适应力等级占比 / %				
	高	较高	中	较低	低
重庆	3.01	45.23	26.23	24.71	0.77
成都	1.37	22.24	36.01	34.38	6.31
达州	1.79	9.54	17.50	16.49	54.02
广安	1.47	33.01	15.66	27.91	21.43
南充	1.74	27.96	17.88	24.74	27.56
遂宁	4.44	35.15	18.97	33.03	10.60
资阳	7.98	36.69	22.01	29.12	3.87
内江	23.31	31.04	19.52	21.39	5.17
自贡	2.23	12.89	26.96	20.34	37.44
宜宾	1.08	15.38	22.23	22.41	38.32
泸州	1.05	14.39	28.71	23.57	32.89
乐山	0.69	14.10	20.69	24.82	41.35
眉山	1.54	19.62	18.30	25.83	34.79
雅安	0.26	11.73	18.02	22.71	47.31
德阳	1.27	27.01	21.93	31.73	18.98
绵阳	0.27	1.11	13.02	37.27	49.71

注：灰底表格表示等级面积占比超过20%

受到系统外界的干扰，空间稳定性越低。

从分布特征来看，各城市空间脆弱性空间分布不均匀，呈现出“南北两极高，中间低”的空间格局（图3）。随着成渝发展轴线的形成，沿线城市得到极大发展，其城市空间脆弱性较低。雅安、乐山、自贡、泸州、达州、绵阳处于成渝地区双城经济圈的边缘地带，受成渝协同发展的带动作用较弱，外加自身城市空间条件差，因此脆弱性较高。

### 3.2.2 空间子系统脆弱性分异特征

成渝地区双城经济圈的整体城市空间暴露性程度处于较高等级，空间敏感性整体处于中度状态，空间适应力整体处在较低等级。暴露性最高的城市空间是绵阳、自贡、泸州。敏感性最高的城市空间是雅安、达州、乐山。适应力与城市空间脆弱性成反比，意味着适应力越高，城市空间脆弱性程度越小。城市空间适应力值越大，城市空间适应力就越低。城市空间适应力最低的城市空间是雅安、自贡、眉山。

利用自然断点法将城市空间子系统脆弱性数值分成低、较低、中、较高、高5个等级。仅有重庆和宜宾处于低空间暴露性等级。处于低空间敏感性等级的城市仅有德阳，处于低空间适应力的城市唯有雅安。高空间暴露性、高空间敏感性和低空间适应力等级对应的城市大体分布在成渝地区双城经济圈的外围区。各暴露性等级的城市空间分布较为分散，各个等级交叉错落分布；各敏感性等级的城市空间分布大致成组团。高敏感性城市空间主要分布在西南，外加东北方向的达州。较高空间敏感性城市空间分布在东部，外加西部的成都。中空间敏感性城市空间分布在北部，外加南部的泸州。较低空间敏感性城市空间分布在中部；各适应力等级的城市空间分布较为零散，但较低等级以下空间适应力对应的城市在空间分布上由区域中部向外呈放射状分布。见图4。

### 3.3 城市空间脆弱性影响因素

城市空间脆弱性测度，需对其在空间上的分异特征进行分析，也需分析城市空间致脆的影响因素。研究引入障碍度模型<sup>[18]</sup>，对城市空间各种因素的影响

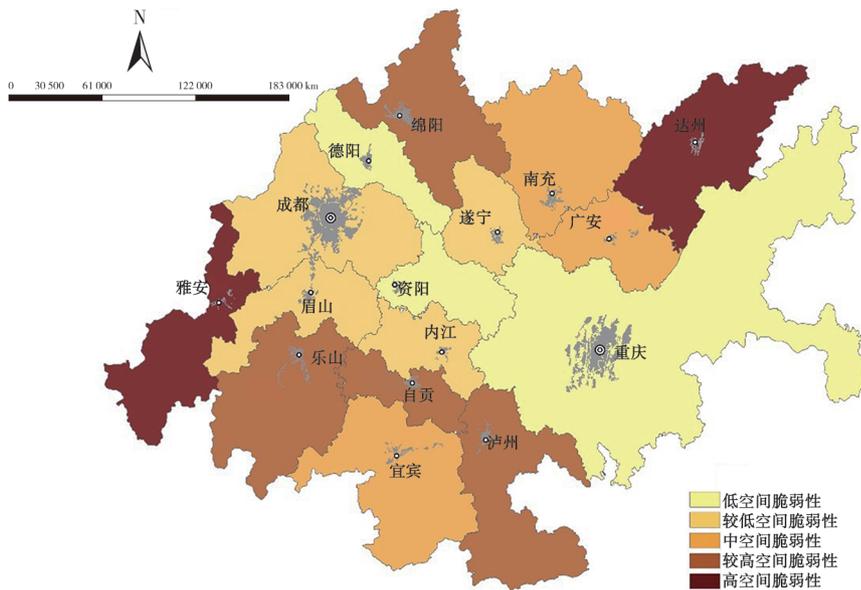
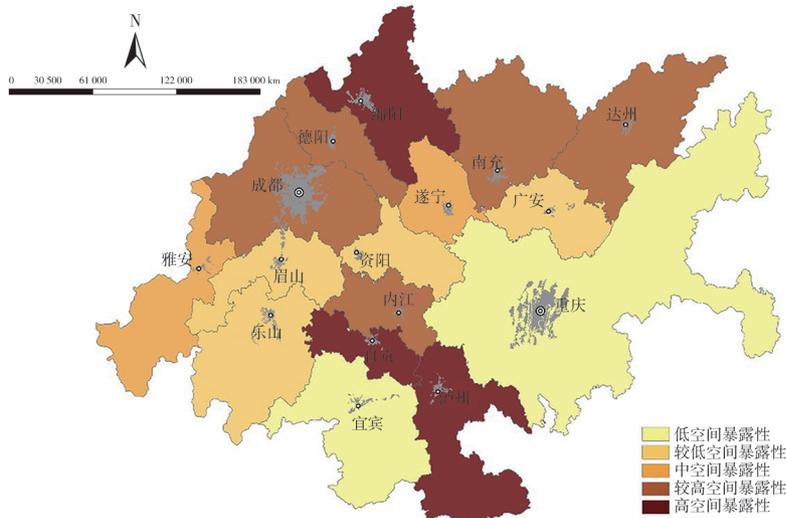
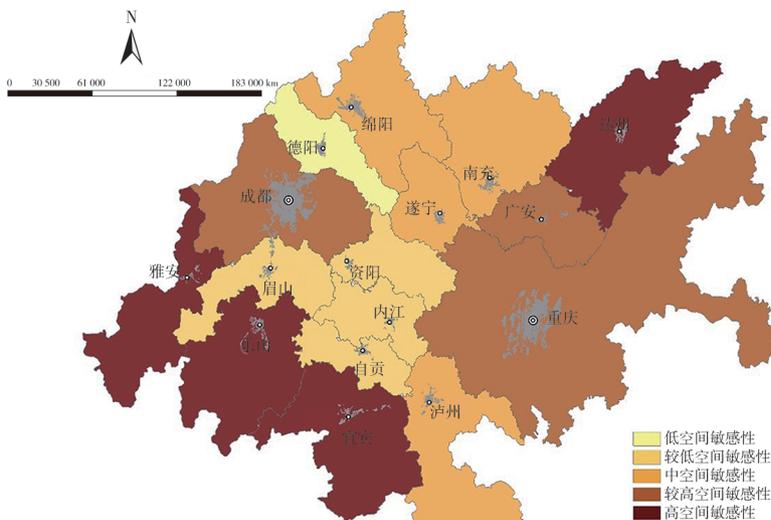


图3 成渝地区双城经济圈各城市空间脆弱性分布

Fig.3 Spatial vulnerability distribution of cities in Chengdu-Chongqing economic circle



(a) 成渝地区双城经济圈城市空间暴露性分布



(b) 成渝地区双城经济圈城市空间敏感性分布

程度进行量化评估。见表6。

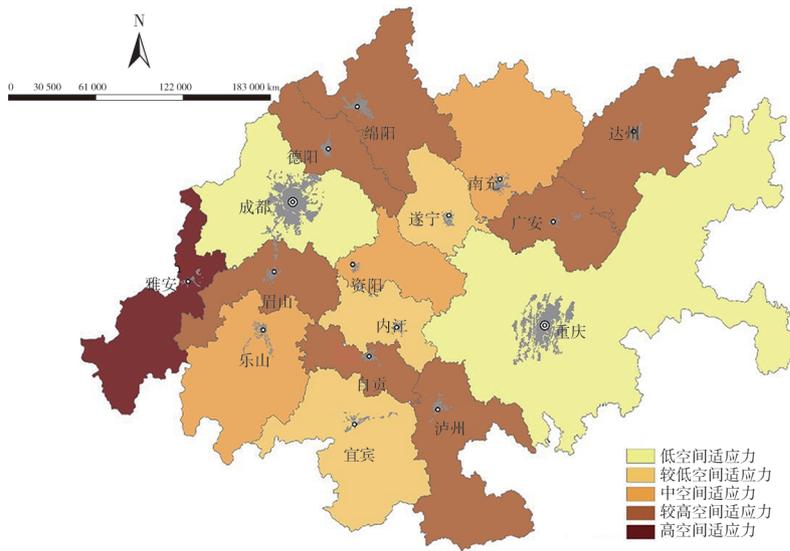
成渝地区双城经济圈各城市空间脆弱性风险主要由城市空间形态复杂、局部空间建筑密度过高、地质灾害易发和开敞空间缺少等因素作用所致。城市空间形态和局部空间密度的控制和调整、地质灾害的防治、开敞空间的完善应成为降低成渝地区双城经济圈各城市空间脆弱性的重要方向。人口密度、建筑密度、地形起伏度、地质灾害易发区域、人口密度，分别对应城市空间致脆的关键因素，未来城市空间的可持续发展要特别注重此方面问题。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

城市空间既是灾害释放能量的受体，也是次生灾害产生的主体。在外部风险持续干扰下，城市空间脆弱性问题不断加剧，应对问题的脆弱性测度成为城市韧性发展的关键举措。本研究构建城市空间脆弱性综合测度指标体系和模型，探明城市空间脆弱性分异特征和致脆因素，并提出脆弱性空间发展优化策略。研究完善了基于空间视角的城市脆弱性研究体系，为优化脆弱性城市空间提供科学依据。研究结果表明：成渝地区双城经济圈城市空间脆弱性整体处于中度脆弱状态；部分中心老城区呈现高脆弱性；复杂的城市空间形态、高建筑密度、地质灾害风险和开敞空间不足是主要致脆因素，这与前人<sup>[19-21]</sup>相关研究结果基本一致。

基于“暴露—敏感—适应”框架的脆弱性研究已得到国内外研究者的普遍认可，获得了具有科学性和可应用性的脆弱性评价结果<sup>[15, 22-23]</sup>。但在数据处理和脆弱性测度方法上，不同学者的研究存在一定差异，例如：李彤玥<sup>[15]</sup>通过主成分分析和聚类分析，评估兰州市小尺度街道单元的城市空间脆弱性，而本研究覆盖成渝地区双城经济圈16个地级市，所以在计算方法上结合了层次分析法与熵值法，提高了脆弱性测度的科学性和准确性；本研究采用多源大数据，并通过ArcGIS空间分析技术转化、修正基础数据，相较于Zhang等<sup>[23]</sup>采用的发展统计公报和统计年鉴数据，数据库的多样性



(c) 成渝地区双城经济圈城市空间适应力分布

图4 成渝地区双城经济圈各城市空间子系统脆弱性分布

Fig.4 Spatial vulnerability distribution of urban subsystems in Chengde-Chongqing economic circle

共12项指标,形成了更细、更全面的空间脆弱性及其分异特征的分析框架,对其他地区空间脆弱性的研究具有一定的适用性和启示作用。此外,与现有以台风<sup>[9]</sup>、洪水<sup>[11]</sup>等单一灾害情境下的城市空间脆弱性研究不同,本研究着眼于综合性、多因素的空间脆弱性测度,具有更强的前瞻性和广泛的应用价值。

从空间视角探究城市脆弱性是未来我国韧性城市研究的一个重要方向,也是对城市脆弱性相关研究内容的补充。受制于笔者研究水平,从空间视角探索城市脆弱性及其空间分异特征和影响因素,仅初步架构了研究框架,得出初步的结论,仅考虑了宏观和中观尺度,未考虑微观尺度城市空间的构成要素。因此,未来可进行多尺度的研究,以期为脆弱性城市空间的优化提供更科学的指引。

表6 各城市脆弱性空间的主要障碍因子

Tab.6 Main contributing factors to urban vulnerability spaces

城市	第一障碍		第二障碍		第三障碍	
	因子	障碍度 / %	因子	障碍度 / %	因子	障碍度 / %
重庆	A21	20.531	A25	15.271	A24	14.399
成都	A11	22.459	A25	15.072	A22	13.981
达州	A23	15.129	A25	12.887	A12	11.897
广安	A23	15.830	A34	13.548	A12	13.018
南充	A11	14.635	A23	13.330	A34	12.263
遂宁	A23	14.642	A12	14.393	A31	11.314
资阳	A31	15.454	A25	14.657	A32	14.389
内江	A23	17.181	A12	15.645	A32	11.619
自贡	A11	19.419	A25	11.085	A34	10.691
宜宾	A25	19.572	A21	14.679	A23	12.743
泸州	A12	18.143	A25	12.477	A23	12.299
乐山	A23	18.200	A12	13.182	A21	12.079
眉山	A23	14.195	A31	13.185	A12	11.727
雅安	A23	15.483	A34	12.820	A12	11.711
德阳	A12	21.520	A31	14.816	A34	13.652
绵阳	A12	18.792	A34	12.943	A23	10.193

注: A11是人口密度, A12是建筑密度, A21是地形起伏度, A22是水体指数, A23是分形维数, A24是城市空间扩展强度指数, A25是地质灾害易发区面积比, A31是公共服务设施多样性, A32是城市内部交通可达性, A34是开敞空间指数

和精度更高。目前,基于空间视角的城市脆弱性研究没有独立完善的体系,对城市空间脆弱性的研究大多是城市耦合脆弱性的一部分,程林<sup>[14]</sup>、Shi等<sup>[22]</sup>纳

入部分空间要素作为评价指标,结合经济、社会、扰动等因子共同测度城市脆弱性程度。本研究通过文献综述、理论分析和专家咨询筛选制定了空间维度的

#### 4.2 策略建议

基于对成渝地区双城经济圈城市空间脆弱性特征分析和影响因素探究,从空间维度提出三方面的优化策略。

(1) 塑造高生态连通性的城市空间形态。科学优化生态空间布局,构建连续的生态走廊和绿地廊道,串联生态节点,是提高生态连通性和塑造韧性空间形态的关键措施<sup>[24]</sup>。有助于缓解因景观破碎带来的生态问题,提升区域生态质量。应重点保护或重塑生态斑块间的空间联系,优化生态空间布局,加强区域生态网络建设,以提升城市生态韧性,降低城市空间脆弱性。

(2) 构建具有层级结构体系的城市道路网络。研究<sup>[25]</sup>表明,提高道路网络密度不足以提升城市空间韧性,城市道路网络的形态与层级同样起着关键作用。应逐步完善不同级别的道路网络,以优化道路网络的层级结构。宏观尺度上,建设具有层级结构的主、次干道网络,提升城市交通网络的结构鲁棒性;中微观尺度上,增加市中心的路网密度,强化主干路网的跨层级衔接,有效保障公共服务和救灾物资的流动及受灾人群的转移。

(3) 搭建多模块协同的公共服务功能体系<sup>[26]</sup>。科学规划城市空间,确保公共服务设施均衡分布,实现全覆盖。各

类公共服务功能应相互协同,明确管理界限并有效衔接,推动资源共享和功能互补。信息化方面,利用现代技术构建公共服务平台,实现智能化、便捷化服务。通过大数据和云计算精准配置资源,提高服务质量和效率。社区参与方面,鼓励居民参与建设与管理,营造共建共享氛围,并通过反馈优化服务体系。绿色生态方面,融入环保理念,通过绿色建筑和节能技术,提升城市生态品质。

#### 4.3 结论

本研究通过对城市空间脆弱性相关研究的梳理和总结,构建城市空间脆弱性综合测度指标体系。以成渝地区双城经济圈16个地级市的城市空间为研究对象进行实证研究,对其城市空间脆弱性大小及其空间分异特征进行分析。利用障碍度分析法诊断脆弱性城市空间的致脆因素并提出脆弱性城市空间优化策略,以期降低城市空间脆弱性和提升空间可持续发展提供理论支持。具体研究结论如下:

(1) 从城市空间脆弱性分布来看,各城市的空间脆弱性在成渝地区双城经济圈区域内分布不均匀,总体城市空间处于中度脆弱状态,这与不同地区的经济社会发展水平、地形特征和政策导向等因素密切相关。

(2) 根据地理区位将各个城市空间进行分类,可以看出城市空间脆弱性以成都、重庆为核心中心城市逐渐递增。这是由于越向外围区域建筑密度越高、空间形态越复杂、地质灾害频发,加之缺乏足够的开敞空间,使其脆弱性水平高于其他区域。

(3) 城市空间脆弱性影响因素诊断表明,成渝地区双城经济圈各城市的人口密度、建筑密度、地形起伏度、地质灾害易发是未来城市韧性发展要特别注重的方面。

(4) 针对成渝地区双城经济圈不同城市的具体情况,因地制宜地制定城市空间优化和发展策略:基于分形的城市空间形态控制,被动与主动分散的城市空间布局,公共设施的提升与完善,地质灾害防治。

#### 参考文献

[1] 李云燕,赵万民.基于空间途径的城市防灾减灾方法体系建构研究[J].城市规划,2017,41(4):62-68.

[2] 尹名强,胡纹,何宝杰.美国高温适应规划探索及凤凰城实践的探究与启示[J].西部人居环境学刊,2023,38(6):1-8.

[3] 陈晓红,许晓庆,刘艳军,等.基于三生空间质量的哈长城市群城市脆弱性时空演变格局及驱动力研究[J].生态学报,2022,42(15):6395-6405.

[4] HE Y, MA D, XIONG J, et al. Flash flood vulnerability assessment of roads in China based on support vector machine[J]. Geocarto International, 2022, 37(21): 6141-6164.

[5] 陈轶,刘涛,张峰,等.面向城市洪涝的社会脆弱性空间识别与规划策略:以南京市为例[J].城市发展研究,2023,30(2):23-31.

[6] 夏陈红,马东辉,郭小东,等.面向系统韧性的城市防灾空间运行逻辑与规划优化路径[J].城市发展研究,2024,31(9):49-55.

[7] 陈倬,余廉.城市安全发展的脆弱性研究:基于地下空间综合利用的视角[J].华中科技大学学报(社会科学版),2009,23(1):109-112.

[8] 李鹤,张平宇,程叶青.脆弱性的概念及其评价方法[J].地理科学进展,2008,27(2):18-25.

[9] 陈路凯.台风灾害下城市空间脆弱性评价研究[D].哈尔滨工业大学,2021.

[10] PINTO M D, CHMUTINA K, PALAIOLOGOU F, et al. The role of the spatial network in urban disaster risk variations: reimagining the notion of spatial vulnerability at the urban scale[J]. International Journal of Disaster Risk Science, 2024, 15(3): 303-316.

[11] TANG X, HUANG X, TIAN J, et al. A novel framework for the spatiotemporal assessment of urban flood vulnerability[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 109: 105523.

[12] GARCÍA-AYLLÓN S, FRANCO A. Spatial correlation between urban planning patterns and vulnerability to flooding risk: a case study in Murcia (Spain) [J]. Land, 2023, 12(3): 543.

[13] 张晓瑞,李涛,方创琳,等.城市脆弱性的综合测度研究[J].地理与地理信息科学,2016,32(2):89-93.

[14] 程林.大城市脆弱性分析及其规划学意义[D].东北师范大学,2010.

[15] 李彤玥.基于“暴露—敏感—适应”的城市脆弱性空间研究:以兰州市为例[J].经济地理,2017,37(3):86-95.

[16] 张威涛.疫情下的城市—风险互构系统的理论构建与空间测评[J].城市规划学刊,2022(1):96-102.

[17] 林峰,信忠保,彭钟彝.青藏高原人居环境:评估指标、评估框架及其时空变化[J].生态学报,2024,44(20):1-18.

[18] 陈伟珂,闫超华,董静,等.城市脆弱性时空动态演变及关键致脆因子分析:以河南省为例[J].城市问题,2020(3):38-46.

[19] GUO Z, LI Z, LU C, et al. Spatio-temporal evolution of resilience: the case of the Chengdu-Chongqing urban agglomeration in China[J]. Cities, 2024(153): 105226.

[20] 高鑫,丁晨浩,巫昊燕,等.成渝城市群网络空间格局及其结构韧性评估[J].西部人居环境学刊,2024,39(3):147-154.

[21] 王彩丽,闫绪娟.成渝城市群城市韧性时空格局演变及障碍因子识别[J].重庆大学学报(社会科学版),2023,29(3):21-33.

[22] SHI B, LIU H, HUANG L, et al. Increasing vulnerability of village heritage: evidence from 123 villages in Aba prefecture, Sichuan, China[J]. Land, 2023, 12(11): 2048.

[23] ZHANG Y, SHEN J, LI Y. Atmospheric environment vulnerability cause analysis for the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan region[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(1): 128.

[24] 颜文涛,任婕,张尚武,等.上海韧性城市规划:关键议题、总体框架和规划策略[J].城市规划学刊,2022(3):19-28.

[25] 颜文涛,李子豪,付磊.基于“形态—网络—功能”的城市韧性评估方法:以十堰市中心城区为例[J].上海城市规划,2023(1):1-8.

[26] 翟国方.气候变化背景下规划视角的城市雨洪灾害韧性应对:关键概念、基本思路和通用框架[J].城市规划学刊,2024(1):29-37.