

中文引用格式:王威,龚玉涿,朱峻佚,等.城市建筑群抗震韧性集成评估方法[J].中国安全科学学报,2025,35(4):219-226.

英文引用格式:WANG Wei, GONG Yuzhuo, ZHU Junyi, et al. Integrated evaluation methods of seismic resilience of urban group buildings[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4): 219-226.

## 城市建筑群抗震韧性集成评估方法\*

王威<sup>1</sup>教授,龚玉涿<sup>2</sup>,朱峻佚<sup>1</sup>,夏陈红<sup>1</sup>助理研究员,郭小东<sup>\*\*1</sup>教授

(1 北京工业大学 建筑与城市规划学院,北京 100124;2 北京工业大学 建筑工程学院,北京 100124)

中图分类号:X915.5

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.1116

基金项目:国家自然科学基金资助(52278472);北京市自然科学基金资助(8232004,8254041)。

**【摘要】**为评估不同需求下城市建筑群抗震韧性,探索城市建筑群抗震韧性集成评估方法,利用树增强朴素贝叶斯网络(BN)方法构建BN模型,通过整合建筑类型、建造年代、结构类型等关键指标,快速预测不同目标地震下的建筑震害损伤状态;采用韧性指数法、韧性要素等级法、风险韧性分析法和建筑群落韧性指标评价法4种韧性评估方法,集成评价北京市丰台区某街道群体建筑的抗震韧性,并对比分析各方法的优缺点及适用性。结果表明:韧性指数法适用于快速评估建筑恢复能力;韧性要素等级法便于直观显示建筑韧性等级;风险韧性分析法对灾害不确定性和随机性有较好处理能力;建筑群落韧性指标评价法则强调功能需求对综合评估的影响。

**【关键词】**城市建筑群;抗震韧性;集成评估;损伤状态;贝叶斯网络(BN)

### Integrated evaluation methods of seismic resilience of urban group buildings

WANG Wei<sup>1</sup>, GONG Yuzhuo<sup>2</sup>, ZHU Junyi<sup>1</sup>, XIA Chenhong<sup>1</sup>, GUO Xiaodong<sup>1</sup>

(1 College of Architecture and Urban Planning, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2 College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** To evaluate the seismic resilience of urban group buildings under different demands, an integrated assessment methodology was developed for urban building clusters' earthquake resistance. A tree-augmented naive Bayesian method was employed to construct a BN model that rapidly predicted structural damage states under various target earthquakes through multi-parameter analysis including building types, construction eras, and structural configurations. Multiple resilience evaluation theories and methods-comprising the resilience index method, resilience element rating method, risk-resilience analysis method, and group buildings resilience indicator evaluation method-were integrated to comprehensively assess the seismic resilience of group buildings in a specific street of Fengtai District, Beijing. Comparative analyses were conducted to examine the advantages, limitations, and applicability of these approaches. The results indicate that the resilience index method proves suitable for rapid assessment of building recovery capacity, while the resilience element rating method facilitates intuitive visualization of structural resilience levels. The risk-resilience analysis method demonstrates superior capability in handling disaster

\* 文章编号:1003-3033(2025)04-0219-08; 收稿日期:2024-11-12; 修稿日期:2025-02-11

\*\* 通信作者:郭小东(1977—),男,江苏南通人,博士,教授,博士生导师,主要从事城乡安全与防灾韧性规划方面的研究。E-mail: gxd@bjut.edu.cn。

uncertainties and stochastic characteristics, whereas the group buildings resilience indicator evaluation method emphasizes the critical influence of functional requirements on comprehensive assessments.

**Keywords:** urban group buildings; seismic resilience; integrated evaluation; damage states; Bayesian network (BN)

## 0 引言

作为城市空间的重要组成部分,建筑群结构的安全性和功能性在地震灾害中起着至关重要的作用。特别是在地震多发区,提升建筑群抗震韧性成为城市抗震防灾规划的关键问题。

目前,建筑抗震韧性研究更多聚焦于物理韧性方面,FEMA<sup>[1]</sup>和 PEER<sup>[2]</sup>等机构提出一系列抗震评估标准和方法,指导建筑抗震设计和韧性评估。AGHABABAEI 等<sup>[3]</sup>开发了基于层次贝叶斯网络(Bayesian Network, BN)的住房基础设施洪灾韧性模型;LI Peiran 等<sup>[4]</sup>提出基于蒙特卡罗模拟的框架结构建筑抗震韧性的方法;CHEN Xinglin 等<sup>[5]</sup>结合动态网络框架开发了建筑系统评估模型;REN Hao 等<sup>[6]</sup>提出考虑外部因素对城市建筑群抗震韧性影响的评估模型;SALADO 等<sup>[7]</sup>用修复成本、占用率和资产价值作为功能性指标来量化建筑的韧性指数;SANDERSON 等<sup>[8]</sup>使用 BN 开发了一个空间明确的社区决策支持框架;KAMESHWAR 等<sup>[9]</sup>开发了一个概率决策支持框架,并采用 BN 进行社区韧性量化评估;金赞赞等<sup>[10]</sup>通过构建分类易损性 BN 模型来计算地震易损性指数;张涵<sup>[11]</sup>结合功能分区和马斯洛需求理论提出建筑群抗震韧性评估方法;贾明明等<sup>[12]</sup>探讨了建筑群地震风险韧性;王威等<sup>[13]</sup>提出基于“源体力”理论的城市抗震安全韧性评估模型。这些研究为城市建筑群抗震韧性评估提供了理论支持,但现有研究多集中在单一层次或单体建筑的评估,忽略了建筑群之间的相互影响,也未能有效整合多种评估方法。

鉴于此,笔者拟通过构建 BN 快速预测城市建筑群震后损伤状态,以此为基础,采用 4 种不同的抗震韧性评价方法评估北京某城区建筑群的韧性,进而阐述不同抗震韧性评价方法的适用性,为不同评价需求选择合适的韧性评价方法提供理论依据。

## 1 研究区与数据来源

### 1.1 研究区概况

北京市丰台区某街道,东西最大距离 2.7 km,南北最大距离 1.7 km,总面积 3.1 km<sup>2</sup>,下辖 16 个社

区,总人口 8.5 万人。研究街区如图 1 所示。



图 1 研究街区

Fig. 1 Research blocks

### 1.2 数据来源

数据来源于《北京市韧性城市空间专项规划》中的“建筑物震害模拟专项评估”研究,结合现场调研数据及地理信息系统空间数据,选取研究地区所有建筑(601 栋)的建筑类型、建造年代、结构层数、结构类型、场地类型、震害等级、损伤状态等数据作为样本数据集。

## 2 基本理论与集成评估方法

通过 BN 模型评估城市建筑群的震害损伤状态,并根据评估结果选用不同的韧性评价方法进行分析。首先,确定影响建筑震害风险的关键指标,转化为 BN 中的数值指标;其次,选择代表性街区,利用历史数据构建样本数据库,在 SPSS Modeler 软件中选择树增强朴素 BN 法构建震害状态评估模型;然后,选择极大似然法学习参数,获取节点的概率分布,并验证评估结果;最后,基于模型的损伤评估结果,使用韧性指数法、韧性要素等级法、风险韧性分析法和建筑群落韧性指标评价法实现该地区建筑群的抗震韧性集成评估,并利用 ArcGIS 软件将结果可视化以便后续图示分析。

### 2.1 BN 状态评估法

BN 作为研究不确定性问题的决策方法,能够将数据结果量化评价并用概率分布清晰明了地表达依赖关系的强弱,因此,BN 方法适用于预测城区建筑群的震后损伤状态。一个简单的 BN 由网络结构  $S$  和参数集合  $\theta$  构成。

参数集合  $\theta$  是与每个变量相对应的局部概率,是给定父节点下的条件概率的集合,其中,包含属性变量  $x_1, x_2, \dots, x_n$  和类变量  $c$ , 如下式:

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \lambda P(c_j) P(x_1, x_2, \dots, x_n | c_j) \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为正归一化参数,通常设置为 1;  $P(c_j)$  为  $c_j$  的先验概率;  $P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n)$  为  $c_j$  的后验概率,它结合先验概率和观测数据,反映这些数据对类别概率的影响。因此,式(1)还可以表示为:

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \lambda P(c_j) \prod_{i=1}^n P(x_i | x_1, x_2, \dots, x_{i-1}, c_j) \quad (2)$$

依据贝叶斯最大后验概率原则,一个分类器会挑出能够使得后验概率最大的类别作为给定实例的标签。在朴素 BN 中,假设属性之间在类别条件下是相互独立的,式(1)可简化为:

$$P(c_j | x_1, x_2, \dots, x_n) = \lambda P(c_j) \prod_{i=1}^n P(x_i | c_j) \quad (3)$$

构建 BN 包括网络参数选取、网络结构学习、网络参数学习及模型验证 4 部分。

1) 网络参数选取。确定构成 BN 的基础变量,即确定影响城市建筑群震害风险状态的关键指标。依据文献[10],关键指标为建筑类型、建造年代、结构层数、结构类型、场地类型、震害等级,其分类描述见表 1。

表 1 关键指标及其分类描述

Table 1 Key indicators and their categorization

指标	序号	分类描述
场地类型	1	I 类
	2	II 类
	3	III 类
	4	IV 类
结构类型	1	钢混结构
	2	混合结构
	3	砖木结构
	4	其他结构
结构层数	1	[1,2] 主要指老旧房屋
	2	[3,6]
	3	[7,8]
	4	[9,10]
	5	(10, ∞)
建造年代 / 年份	1	(0, 1970)
	2	[1970, 1979]
	3	[1980, 1989]
	4	[1990, 1999]
	5	[2000, 2025]

续表 1

指标	序号	分类描述
建筑类型	1	医疗卫生、教育、行政办公建筑
	2	城镇住宅、文化娱乐建筑
	3	环境卫生、餐饮服务建筑
	4	体育、园林等其他建筑

2) 网络结构学习。根据图 1 所示地区建筑的相关属性信息建筑群震害损伤状态等级采用“基本完好-轻微破坏-中等破坏-严重破坏-倒塌”5 级损伤指标。运用 SPSS Modeler 分析该地区属性数据集,选用树增强朴素 BN 法,以建筑类型、建造年代、结构层数、结构类型、场地类型、震害等级为输入变量,以震害损伤状态等级为目标变量,构造建筑群震害状态评估的 BN 结构,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,各指标对建筑群震害风险贡献重要性程度不同,其中,震害等级的重要性最大,对建筑损伤状态的影响最为敏感,各指标具体重要性如图 3 所示。由图 3 可知:各个指标之间的因果关系顺序不存在逆序或回路关系,且表现出明显的影响和被影响的层次性关系,表明 BN 模型能有效预测建筑群震害损伤状态。

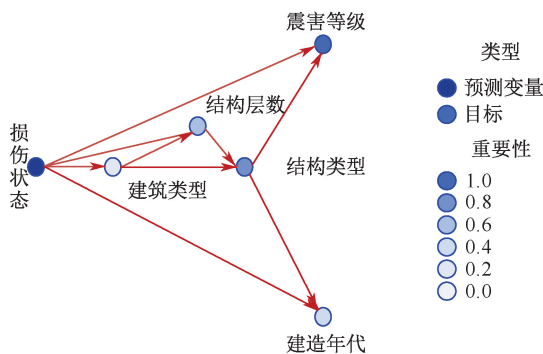


图 2 BN 结构

Fig. 2 BN structure diagram

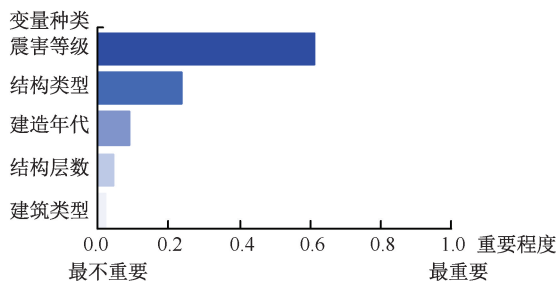


图 3 预测变量重要性

Fig. 3 Importance of predictor variables

3) 网络参数学习。依据建立的树增强朴素 BN,在 SPSS Modeler 中选择极大似然法进行参数学

习,以获得根节点先验概率以及子节点的条件概率。再利用 GeNIe 软件,输入已获得的各节点概率,得到最终的 BN 模型如图 4 所示。

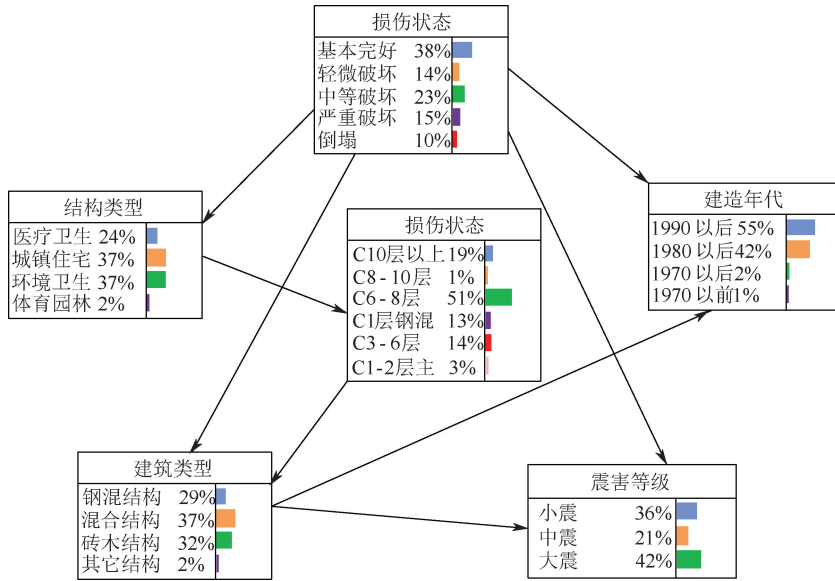


图 4 BN 模型

Fig. 4 BN model

4) 网络模型验证。利用已建立的 BN 评估模型,验证街区部分建筑样本。根据属性数据随机选取 20 个样本点输入该模型,结果如图 5 所示。BN 模型的评估结果与实际震害基本一致,仅 8 号建筑的结果相差一级,整体评估精度较高,证明了模型的适用性。

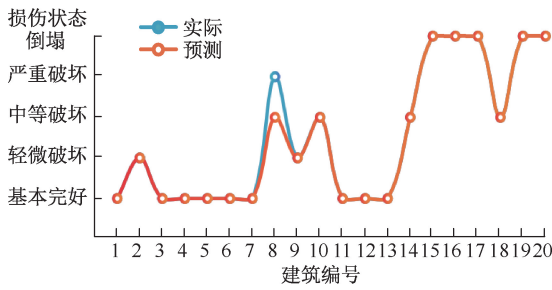


图 5 预测结果对比

Fig. 5 Comparison chart of forecast results

### 2.2 抗震韧性评估理论与方法

1) 韧性指数法。主要通过震后恢复时间成本体现抗震韧性并将其转化为韧性指数恢复曲线,如图 6 所示,其函数表达式如下:

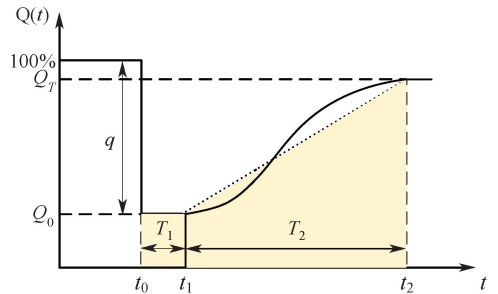
$$R = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_2} Q(t) dt \quad (4)$$

式中: $R$  为建筑韧性指数; $t_0$  为灾害情景发生时间节点; $t_2$  为功能恢复至稳定状态的时间节点; $Q(t)$  为建筑的灾后恢复函数。根据实际情况,地震发生后

建筑功能损失后会有一段停滞时间,采用停滞时间及恢复总时间的比值来衡量停滞时间长短,即

$$K = T_1 / (T_1 + T_2) \quad (5)$$

式中  $K$  为停滞时间系数,根据不同地区建筑情况,建议取值范围为 0.1~0.3。



注: $q$  为发生地震时建筑结构的 功能损失, $Q_0$  为灾后 剩余功能, $Q_r$  为灾后功能恢复目标。

图 6 建筑震后恢复曲线

Fig. 6 Building recovery curves after earthquakes

韧性指数表示为图 6 中灰色面积除以灾害发生后恢复所需时间,将恢复曲线  $Q(t)$  所围成的曲面面积简化为直线梯形面积进行计算,即:

$$\int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt \approx \frac{1}{2} [(1 - q) + 1] T_2 \quad (6)$$

整理可得,韧性指数的表达式为

$$R = k(1 - q) + \frac{1}{2}(1 - k)[(1 - q) + 1] \quad (7)$$

灾后恢复目标  $Q_r$  设为 1;功能损失  $q$  用易损性

指数  $M$  计算。易损性指数由建筑结构各状态破坏概率与震害指数之积表示,表达式为:

$$M(\text{IM}) = \sum_D P(D_i | \text{IM}_j) \times \text{DF}(D_i) \quad (8)$$

式中:  $P(D_i | \text{IM}_j)$  为建筑物在指定的地震强度 ( $\text{IM}_j$ ) 下不同破坏状态 ( $D_i$ ) 的概率,  $D_i = \{ \text{基本完好, 轻微破坏, 中等破坏, 严重破坏, 倒塌} \}$ ;  $\text{DF}(D_i)$  为与破坏状态  $D_i$  对应的震害指数,  $\text{DF}(D_i) = \{ 0.050, 0.200, 0.425, 0.700, 0.925 \}$ 。

2) 韧性要素等级法。根据《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 38591—2020), 人员伤亡、修复费用和修复时间被用作评估标准, 以此确定一星、二星和三星等级。星级越高表示韧性等级越高, 三参数的最低值作为建筑抗震韧性等级评级。

人员伤亡情况利用概率模型计算。建筑内人员伤亡可使用名义受伤率和名义死亡率计算:

$$M_H = \sum_{i=1}^5 \left[ \gamma_{hi} \sum_{k=1}^{n_g} \zeta_k A_{ik} \right] \quad (9)$$

$$M_D = \sum_{i=1}^5 \left[ \gamma_{di} \sum_{k=1}^{n_g} \zeta_k A_{ik} \right] \quad (10)$$

式中:  $M_H$  为受伤人数;  $M_D$  为死亡人数;  $\zeta_k$  为第  $k$  层的室内人员密度;  $n_g$  为楼层数;  $A_{ik}$  为  $i$  破坏等级第  $k$  层的建筑面积;  $i=1, 2, \dots, 5$  分别表示基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、和倒塌;  $\gamma_{hi}$ 、 $\gamma_{di}$  分别为名义受伤率和名义死亡率, 对应不同等级破坏程度。第  $k$  层室内人员密度与建筑功能有关, 根据建筑功能确定其取值。

采用伤亡人数占总人数比例即伤亡率, 作为人员伤亡评价的指标, 用下式计算:

$$\gamma_H = \frac{M_H}{\sum \zeta_m A_m} \quad (11)$$

$$\gamma_D = \frac{M_D}{\sum \zeta_m A_m} \quad (12)$$

式中  $\gamma_H$  与  $\gamma_D$  分别为受伤率和死亡率, %。

修复费用评价指标计算:

$$k = \frac{R_T}{C_T} \quad (13)$$

计算研究区域建筑结构的修复费用, 可考虑当地住宅用房的特点, 参考相关地区抗震性能研究的相关文献, 结合当地建筑材料及施工成本等因素确定单位平方米的工程造价。

采取线性恢复模型评价修复时间, 引入损伤指数和灾害类比指数, 即:

$$T_R = \frac{d \times T_0}{d_0} T_R = \frac{d \times T_0}{d_0} \quad (14)$$

式中:  $T_R$  为修复时间指数;  $T_0$  为用典型建筑计算的相似建筑在  $d_0$  损伤下的修复时间;  $d$  为建筑所受损伤指数;  $d_0$  为范例建筑的损伤指数。

3) 风险韧性分析法。该方法考虑灾害发生时的不确定性与随机性, 通过蒙特卡罗模拟将不确定性转化为样本的确定性响应, 利用超越概率分布抽取复合灾害分析中的数据样本, 并计算每个样本的期望值, 进而利用 BN 模型的计算结果评价其韧性, 该街区建筑群小震情景下出现轻微破坏的概率为 9.47%, 假定取 1 000 000 个控制时间为 50 年的样本, 则规定控制时间内 94 700 个样本出现了轻微破坏。其修复时间  $T_i$  通过式(3)一式(11)计算,  $R_i$  是先前求得的轻微破坏时建筑抗灾韧性指数, 样本的韧性为

$$R(i) = T_i - (T_i - R_i) \quad (15)$$

通过对全体样本的所得结果求期望, 可得整个建筑的韧性指数, 可归纳为下式:

$$R = \frac{1}{T_l} \sum_{i=1}^N \sum_{j=0}^4 [T_l - T_{i,j}(i) + R_j(i)] \quad (16)$$

式中:  $N$  为样本数;  $j=0, 1, \dots, 4$  分别为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏以及倒塌;  $T_{i,j}(i)$  为第  $i$  个样本中各灾害情景下  $j$  破坏级别下建筑的修复时间;  $R_j(i)$  为第  $i$  个样本中建筑物在  $j$  破坏级别下的韧性指数。对于每栋建筑都有且仅有一个考虑所有灾害风险而无需考虑单个灾种的韧性指数, 并将其称为风险韧性指数。

运用式(16)的方法计算建筑群的风险韧性指数, 采用 BN 模型所得地震易损性矩阵, 构造符合超越概率分布的样本。逐一计算样本并求期望值, 计算建筑在  $j$  破坏级别下的修复时间时, 参考修复时间计算的结果, 并对相似建筑按建筑面积简化折算,  $R_j$  参考韧性指数法的计算结果。

4) 建筑群落韧性指标评价法。该方法以韧性要素等级法的评价结果为基础, 结合马斯洛需求层次理论确定权重, 从而综合评价建筑群抗震韧性。具体公式如下:

$$R_{BP} = \sum_{j=1}^m \frac{1}{Z} w_j R_{BTj} \quad (17)$$

式中:  $R_{BP}$  为建筑群抗震韧性性能指标 (建筑群 (Building Portfolio, BP));  $m$  为建筑种类, 该地区根据其使用功能划分为住宅、公共服务、商业和教育 4 类建筑, 即  $m=4$ ;  $Z$  为研究区域中的建筑总数;  $w_j$  为

每类建筑的权重; $R_{BTj}$  为每类建筑的抗震韧性值(建筑种类(Building Type, BT))。表达式如下:

$$R_{BTj} = \sum_i^{n_j} w_{ji} R_{ji} \quad (18)$$

式中: $n_j$  为  $j$  类建筑的建筑总数; $w_{ji}$  为  $j$  类建筑下第  $i$  个单体建筑的权重; $R_{ji}$  为  $j$  类建筑中第  $i$  个建筑的抗震韧性,用上述韧性要素等级法评价结果表示,定义其量化值从未评级到三星,即  $R_{ji}$  取值为 1、2、3 或 4。

在同类型建筑中,以单体建筑面积  $A_{ji}$  的标准值量化第  $i$  个建筑对  $j$  类建筑的抗震韧性贡献度,具体表达式如下:

$$w_{ji} = \frac{A_{ji}}{\sum_i A_{ji}} \times n_j \quad (19)$$

根据马斯洛需求层次理论模型,确定住宅类、教育类、公共服务类和商业类建筑权重,即  $w = [w_1, w_2, w_3, w_4] = [0.31, 0.13, 0.45, 0.12]$ 。

根据要素等级法星级评价结果,按照从未评级到三星依次赋值为 1、2、3、4,分布计算小震、中震、大震的  $R_{BP}$ 。

### 3 建筑群抗震韧性集成评估

#### 3.1 建筑群抗震状态评估

根据街区建筑属性信息,输入 BN 模型,其损伤状态分布如图 7 所示。



图 7 震后损伤状态分布

Fig. 7 Post-earthquake damage status distribution map

统计分析得到该地区地震易损性矩阵,见表 2。

表 2 地震易损性矩阵

Table 2 Seismic vulnerability matrix %

破坏等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏	倒塌
小震	90.52	9.47	0.01	—	—
中震	29.09	45.51	25.39	0.01	—
大震	5.98	29.43	44.22	20.34	0.03

#### 3.2 建筑群抗震韧性集成评估

1) 韧性指数法。根据街区实际情况,取停滞时间系数  $k$  为 0.1,代入式(7)计算,结果如下:小震

下, $R = 1.81$ ;中震下, $R = 1.60$ ;大震下, $R = 1.33$ 。由此可知:随着目标地震的提升,韧性指数呈显著下降的趋势。相较于小震下建筑群的韧性指数,中震和大震下分别下降 11.60% 和 16.90%。

2) 韧性要素等级法。各目标地震作用下的建筑群抗震韧性等级的占比如图 8 所示,统计分析建筑星级评价结果数量占比,见表 3。



图 8 震后星级评价分布

Fig. 8 Post-earthquake star rating distribution

表 3 星级评价结果

Table 3 Star rating results %

目标地震	一星	二星	三星
小震	9	25	66
中震	24	43	31
大震	51	22	13

由表 3 可知:在中震和大震作用下,分别有 2% 和 13% 的建筑未达到评级标准,说明目标地震越高,建筑群中未评级建筑占比越大。同时,满足三星标准的建筑数量逐渐减少,综合韧性评级也随之下降。

3) 风险韧性分析法。风险韧性指数计算结果见表 4,分布如图 9 所示。由表 4 可知:在小震作用下,该街区的风险韧性指数主要集中于极高和高等级,仅有 2% 的建筑为中等级;随着目标地震增大,风险韧性指数迅速下降,大震下的低与极低等级比例显著增加,表现出更高的损伤风险。

4) 建筑群落韧性指标评价法。根据建筑类型属性数据分类,将住房、教育、公共服务和商业 4 类建筑以不同颜色标注,如图 10 所示。



图 9 风险韧性指数分布

Fig. 9 Distribution of risk resilience index

表 4 风险韧性指数计算结果

Table 4 Risk resilience index calculation results

韧性指数	极高	高	中	低	极低
小震	91	7	2	—	—
中震	69	24	7	—	—
大震	33	35	21	8	3

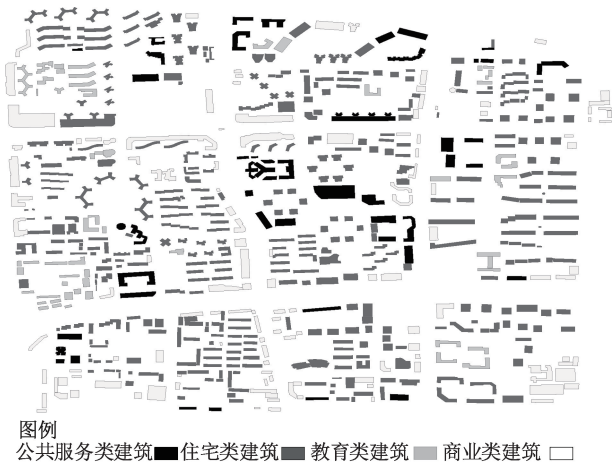


图 10 建筑使用功能分布

Fig. 10 Functional distribution of building use

利用 ArcGIS 软件计算各类建筑下单体建筑的抗震韧性贡献权重  $w_{ji}$ , 结合 2.2 节的建筑群星级评价结果, 计算  $R_{BTj}$ , 结果如图 11 所示。小震下, 韧性指标为 0.43, 中震下为 0.36, 大震下为 0.28。通过 ArcGIS 可视化分析工具, 创建单体建筑权重分布图, 色带从浅到深表示各类建筑中每个建筑的权重大小。深色表示高权重, 建议提升其抗灾能力; 浅色表示低权重, 可在灾后较低优先级恢复。

分析该方法计算结果可知: 随着目标地震增大, 该地区建筑群抗震韧性指标数值约成等值降低, 分别减少 0.07 和 0.08。

4 种评价结果均显示, 小震下该地区韧性水平较高, 随着目标地震增强韧性水平急剧下降。因此, 相关部门需重视大震下城市建筑群的抗震能力, 可采取三维隔震支座与自复位支撑体系优化建筑群抗震拓扑布局; 修订《区域抗震韧性建设导则》增设大震韧性专项指标, 实施年度动态评估机制。

1) 韧性指数法。以功能恢复曲线为基础, 综合考虑建筑群在地震后恢复所需的时间成本, 便于比较不同地区或不同目标地震下的韧性表现, 适合快速评估建筑群的整体恢复水平。然而, 该方法未考虑人员伤亡和修复费用等因素, 仅聚焦于时间和功能恢复。

2) 韧性要素等级法。通过星级划分直观显示

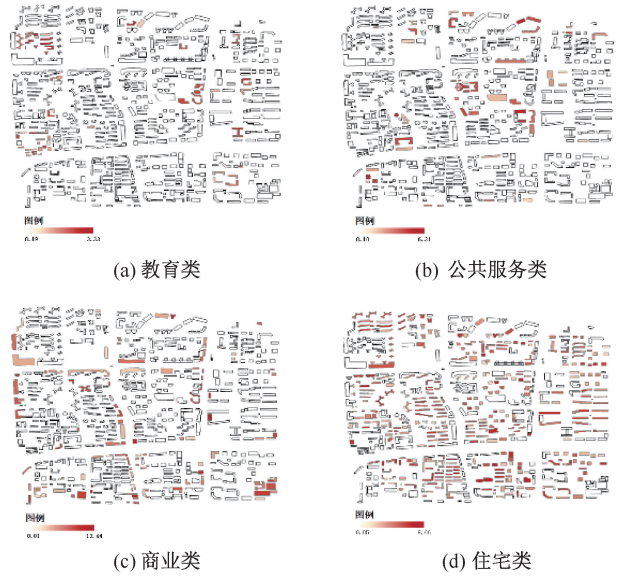


图 11 不同功能下各建筑权重分布

Fig. 11 Distribution of weights of each building under different functions

建筑群的抗震能力, 便于快速了解其整体韧性水平。由于该方法仅关注特定的单一指标, 并未综合考量不同因素的权重关系, 适用于建筑群抗震能力初步等级划分或快速分类分析。

3) 风险韧性分析法。可处理灾害发生时的不确定性和随机性, 尤其适合复杂灾害环境的韧性评估。然而, 对于构建模型和确定参数, 需要较高的数据精度和计算复杂度。因此, 适用于数据资源丰富且需要精确评估建筑群抗震韧性能力的场景。

4) 建筑群韧性指标评价法。引入马斯洛需求层次理论, 考虑建筑功能对整体抗震韧性的贡献。但该方法对权重的主观设定较为敏感, 可能引入一定的不确定性。适用于多类型建筑分布的地区, 尤其是需要综合考虑建筑功能需求的重要场景。

上述韧性评价方法各有优缺点, 应根据具体情况和评价需求选择合适的方法进行抗震韧性集成评估。

## 4 结 论

1) 构建基于树增强朴素 BN 的城市建筑群抗震韧性评估模型, 实证结果表明: 该模型在评估建筑群震害损伤状态方面有较高的准确性和可靠性, 能够为城市抗震规划提供科学依据。

2) 集成分析韧性指数法、韧性要素等级法、风险韧性分析法和建筑群韧性指标评价法 4 种评价方法, 并对比分析各自的优缺点, 可为不同评价需求

下建筑群抗震韧性评估提供灵活的选择方案。

3) 尽管本研究提供一定的基础框架,但仍存在由于数据资源欠缺导致模型评价结果出现误差的问题。未来研究可进一步探讨更多影响建筑群抗震韧性的关键指标,提升评价方法的实用性与准确性。

### 参 考 文 献

- [1] Federal Emergency Management Agency. National response framework (4<sup>th</sup> ed.)[R], 2018.
- [2] MOSALAM K M, KASALANTI A. PEER annual report 2020—2021[R]. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, 2021.
- [3] AGHABABAEI M, KOLIQU M, WATSON M, et al. Quantifying post-disaster business recovery through Bayesian methods[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2021, 17(6): 838–856.
- [4] LI Peiran, LI Xueqian, WANG Xin, et al. Seismic resilience evaluation of reinforced concrete frame considering the effect of mainshock-aftershock sequences[J]. Applied Sciences, 2023, 13(23): DOI:10.3390/app132312620.
- [5] CHEN Xinglin, YU Longxing, LIN Weidong, et al. Urban resilience assessment from the multidimensional perspective using dynamic Bayesian network: a case study of Fujian province, China[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: DOI:10.1016/j.res.2023.109469.
- [6] REN Hao, RONG Chong, TIAN Qinhu, et al. Evaluation model for seismic resilience of urban building groups[J]. Buildings, 2023, 13(10): DOI:10.3390/buildings13102502.
- [7] SALADO C J G, BRUNEAU M, ELHAMI-KHORASANI N. Functionality measures for quantification of building seismic resilience index[J]. Engineering Structures, 2022, 253: DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.108601.
- [8] SANDERSON D, COX D, NARAHARISSETTY G. A spatially explicit decision support framework for parcel- and community-level resilience assessment using Bayesian networks[J]. Sustainable and Resilient Infrastructure, 2022, 7(5): 531–551.
- [9] KAMESHWAR S, COX D T, BARBOSA A R, et al. Probabilistic decision-support framework for community resilience: Incorporating multi-hazards, infrastructure interdependencies, and resilience goals in a Bayesian network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2019, 191: DOI:10.1016/j.res.2019.106568.
- [10] 金赟赟, 李杰. 基于易损性贝叶斯网络的群体建筑快速震害预测[J]. 自然灾害学报, 2020, 29(5): 64–72.  
JIN Yunyun, LI Jie. Rapid earthquake damage prediction for group buildings based on vulnerability Bayesian network[J]. Journal of Natural Disasters, 2020, 29(5): 64–72.
- [11] 张涵. 社区建筑群落的抗震韧性评估研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.  
ZHANG Han. Research on evaluation of seismic resilience for community building portfolio[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [12] 贾明明, 袁昊祯, 彭慧君. 松原地区群体建筑结构地震响应及抗震韧性分析[J]. 地震工程学报, 2022, 44(3): 509–517.  
JIA Mingming, YUAN Haozhen, PENG Huijun. Earthquake response and seismic resilience of group building structures in the Songyuan area[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2022, 44(3): 509–517.
- [13] 王威, 贾文雪, 缪惠全, 等. 基于“源体力”理论的城市抗震安全韧性评估[J/OL]. 工程力学: 1–12. [2024-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240710.2113.009.html>.  
WANG Wei, JIA Wenxue, MIAO Huiquan, et al. Urban seismic safety resilience evaluation based on "risk source-risk exposure-mitigation force" theory[J/OL]. Engineering Mechanics: 1–12. [2024-07-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.O3.20240710.2113.009.html>.

作者简介: 王威 (1981—),男,河南沈丘人,博士,教授,博士生导师,主要从事城乡安全与防灾韧性规划方面的研究。E-mail:ieww@bjut.edu.cn。