

彭巧巧,孟祥瑞,第宝锋,等.四川盆地典型地震灾区居民住房受损影响因素及特征分析[J].地震工程学报,XXXX,XX(X):000-000,DOI:10.20000/j.1000-0844.20230309001  
PENG Qiaoqiao, MENG Xiangrui, DI Baofeng, et al. Analysis of influencing factors and characteristics of residential housing damage in typical earthquake-stricken areas of Sichuan Basin[J]. China Earthquake Engineering Journal, XXXX, XX(X):000-000, DOI:10.20000/j.1000-0844.20230309001

## 四川盆地典型地震灾区居民住房受损 影响因素及特征分析

彭巧巧<sup>1</sup>, 孟祥瑞<sup>1,2</sup>, 第宝锋<sup>1,3</sup>, 曾雅婕<sup>1</sup>, 骆晓龙<sup>1,2</sup>, 胡顺忠<sup>4</sup>

(1.四川大学 四川大学-香港理工大学灾后重建与管理学院,四川 成都 610207;

2.四川省应急管理厅-四川大学综合减灾研究中心,四川 成都 610207;

3.四川大学 考古科学中心,四川 成都 610044;

4.成都军区善后工作办公室,四川 成都 610000)

**摘要:** 2021年9月16日,四川泸县发生 $M_s$ 6.0地震,导致泸县18个乡镇不同程度受灾。通过现场的调查资料,定量统计出灾区居民住房损坏情况,评估房屋结构、震中距离同居民住房损坏程度间的关系,并建立四川盆地典型地震灾区不同地震烈度下的居民住房易损性矩阵。在此基础上,比较此次地震与同震级下其他地震平均震害指数的差异,进而探讨研究区居民住房破坏程度的特征及原因,得出以下结论:(1)住房易损性由高到低为砖混结构、砖木及其他结构(土木、木、石砌结构)、钢混结构;(2)泸县地震中90%的住房损坏出现在震中距6 600 m内的区域;(3)比较同震级两次地震发现,盆地对居民住房造成的损坏比山地低1~2倍。研究结果可为四川盆地及其他地震多发地区震后灾损快速评估、居民住房规划重建提供科学参考依据。

**关键词:** 地震; 房屋结构; 易损性; 四川盆地

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(XXXX)0X-0-09

DOI:10.20000/j.1000-0844.20230309001

## Analysis of influencing factors and characteristics of residential housing damage in typical earthquake-stricken areas of Sichuan Basin

PENG Qiaoqiao<sup>1</sup>, MENG Xiangrui<sup>1,2</sup>, DI Baofeng<sup>1,3</sup>, ZENG Yajie<sup>1</sup>, LUO Xiaolong<sup>1,2</sup>, HU Shunzhong<sup>4</sup>

(1. Sichuan University-Hong Kong Polytechnic University Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610207, Sichuan, China;

2. Department of Emergency Management of Sichuan Province-Sichuan University Comprehensive Disaster Reduction Research Center, Chengdu 610207, Sichuan, China;

3. National Archaeological experimental teaching center, Sichuan University, Chengdu 610044, Sichuan, China;

4. Office of Reorganization Affairs, Chengdu Military Region, Chengdu 610000, Sichuan, China)

**Abstract:** A Ms. (surface wave magnitude) 6.0 earthquake occurred on September 16th, 2021, and

收稿日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(41977245); 四川筑牢长江黄河上游生态屏障目标体系与建设路径研究(SC22ZDYC20)

第一作者简介: 彭巧巧(2000-), 女, 硕士研究生, 主要从事地震灾害损失评估与风险管理方面研究。

E-mail: pengqiaoqiao@stu.scu.edu.cn.

affected 18 towns in Luxian County, Sichuan Province with different impacts. Through an on-site survey, we quantitatively analyzed the damage of the earthquake to residential houses in affected areas, assessed relationships among the house structures, epicentral distance, and degree of residential damage. This led to the development of a matrix of residential housing vulnerability to show the earthquake-affected areas in the Sichuan Basin with different intensities. Based on this analysis, the study compared the difference in average earthquake damage indexes between the affected areas and other regions that had previously experienced earthquakes of the same magnitude. In doing so, we were able to identify some of the key characteristics and factors that contributed to the degree of housing damage observed in the study areas. The following results were drawn: (1) housing vulnerability ranked from high to low involving brick-concrete structure, brick-wood and other structures (civil, wood and stone masonry structure), steel-concrete structure; (2) the areas within 6,600 meters from the epicenter experienced 90% of the earthquake damages; (3) earthquakes of similar magnitude cause 1~2 times less damage to residential housing within the Sichuan basin than areas in the mountainous regions. The results herein can be used as scientific references for the rapid assessment of damages, planning, and reconstruction of residential housing in the post-earthquake period in the Sichuan Basin and other settings prone to earthquakes.

**Keywords:** earthquake; housing structure; fragility; Sichuan basin

## 0 引言

地震是一种突发性强,破坏力巨大,对人类的生命以及财产安全有着重大威胁的自然灾害<sup>[1]</sup>。联合国提出的自然灾害风险性表达式为:风险(risk)=危险性(hazard)×易损性(fragility)<sup>[2]</sup>。由于地震预报仍是世界性难题,其危险性难以防范,对其易损性的研究是降低地震风险十分重要的一环。根据大量震害调查结果,地震导致的人员伤亡、直接经济损失等90%以上都是由建筑物的倒塌破坏造成的<sup>[3-5]</sup>。因此,对居民住房的易损性及其在地震中的受损影响因素及特征进行研究对于减少地震造成的损失具有重要意义。

易损性最开始应用于军事领域<sup>[6]</sup>,后逐渐扩展至包括地震破坏的各种领域。例如,Taniguchi<sup>[7]</sup>提出基于神经网络建筑结构的可靠性预测方法对名古屋市地震建筑物的损失情况进行模拟。Tsai等<sup>[8]</sup>和吕大刚等<sup>[9-10]</sup>运用有限元分析法对地震房屋结构的震害情况进行了分析。Hassaninia<sup>[11]</sup>等结合萨尔波勒扎哈卜镇的地质、岩土及地球物理信息资料,编制了克尔曼沙市的地震微区划图,利用模糊层次综合分析法对该市房屋建筑损坏数据进行了易损性评估。孙柏涛等<sup>[12]</sup>和姚新强等<sup>[13]</sup>利用经验统计法对大量地震数据进行分析并建立了群体建筑地震易损性模型。现有研究多集中于数值模拟、试验研究对建筑力学性能的分析,且多针对某一单体建筑结构,

从区域尺度对地震房屋易损性影响因素及特征的研究较少。

四川是我国地震高发区,特别是盆地西部与青藏高原过渡地带的山区,自2008年以来先后发生了汶川8.0级、芦山7.0级、九寨沟7.0级等多次强震,以往对于地震的相关研究也多集中在该区域。而近年来的长宁6.0级、泸县6.0级等地震则发生于四川盆地内部,这表明四川盆地内部受到的地震灾害风险同样较高。目前对盆地地震造成的房屋易损性和影响因素的研究较少,加之盆地内部地理条件、社会发展水平、人口分布等与川西山地区存在较大差异,因此加强对四川盆地内部的相关研究十分必要。对此,以盆地内部泸县6.0级地震灾区为研究对象,定量统计分析研究区居民住房的损坏情况,评估各影响因素与居民住房损坏程度间的关系,并与2008年攀枝花市6.1级地震以及《中国地震烈度表》给定的平均震害指数进行对比,以探究四川盆地典型地震灾区居民住房损坏特征,以期对地震灾区快速震损评估、规划重建居民住房等方面提供参考。

## 1 研究区概况

据中国地震台网测定,2021年9月16日四川省泸州市泸县发生6.0级地震,震中位置(29.20°N, 105.34°E),震源深度10 km。地震中泸州市龙马潭区、纳溪区、泸县、合江县4个县(区)62个乡镇严重

受灾。此次地震是近年来四川省及泸州市发生的较大震级地震,共造成 16 万居民受灾,2.5 万人紧急转移安置,直接经济损失达 23 亿元人民币<sup>[14]</sup>。泸县地震震中位于四川盆地南缘,川中丘陵与川东平行

岭谷的过渡地带,其发震断层为四川盆地内部重要的华蓥山断裂带,对研究盆地区内地震具有较好代表性。本研究以泸县地震为例,选取受灾较严重的泸县所辖 18 个乡镇(街道)作为研究单元(图 1)。

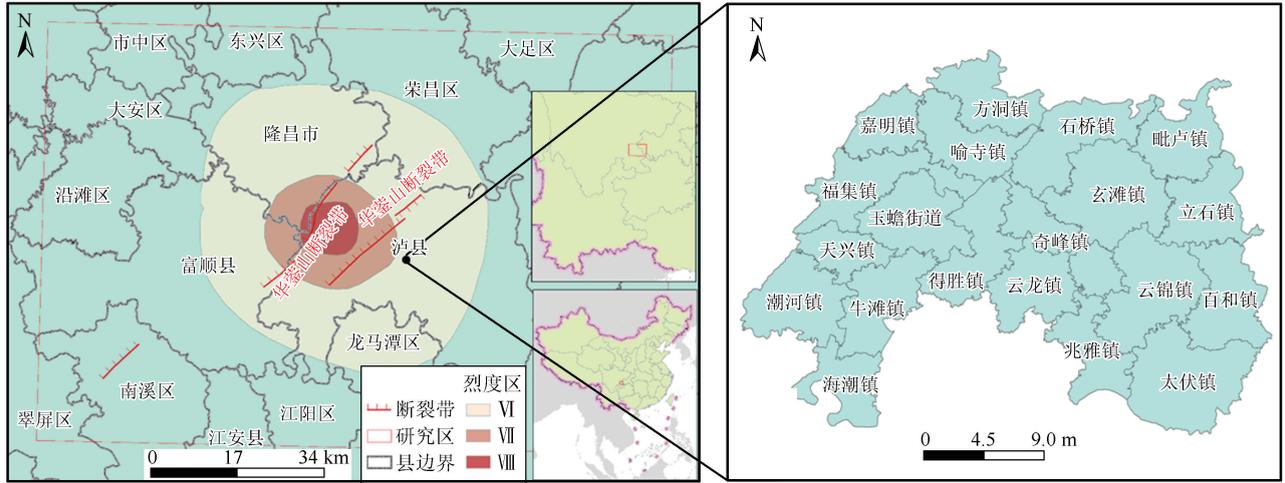


图 1 地震烈度区划及泸县行政区划图<sup>[15]</sup>[审图号:GS(2020)4620号]

Fig.1 Seismic intensity zones and administrative zoning map of Luxian County<sup>[15]</sup>[Review number:GS(2020)No.4620]

## 2 数据和方法

### 2.1 数据来源

数据类型包括文本数据和空间图谱数据。文本数据指来源于四川大学灾后重建与管理学院编写的《泸州市应急管理局泸县“9.16”地震综合调查评估报告》<sup>①</sup>以及四川省泸州市减灾委等相关部门收集的《泸州市灾损统计汇总表》<sup>②</sup>,包括地震居民住房损坏数量以及泸县居民住房总数量。居民住房结构分类采用第六次全国人口普查<sup>[15]</sup>房屋情况普查中的分类,按照承重类型将房屋结构分为钢及钢筋混凝土结构、混合结构、砖木结构及其他结构四种类型。其中钢及钢筋混凝土结构对应此次地震居民住房的钢混框架结构;混合结构与砖混结构相匹配;砖木结构主要指竖向承重结构包括承重墙、柱,水平承重构件包括楼板、屋架(木结构)的结构;其他结构类型指不属于上述类型的结构,包括土木结构、木结构、石砌结构等。空间图谱数据为泸县行政区划数据及卫星地图中各乡镇(街道)的地理位置数据。

### 2.2 分析方法

#### (1) 居民住房破坏比例与破坏程度分析

本研究使用破坏比和破坏指数表示此次地震居民住房的损坏比例和损坏程度。分别计算不同乡镇各种结构类型住房的破坏比及破坏指数,比较不同乡镇及不同结构类型居民住房破坏特征的差异。破

坏比  $p$  及破坏指数  $b$  的计算公式如下:

$$p = \frac{a}{x} \quad (1)$$

式中: $a$  为某类(或某乡镇)住房破坏间数; $x$  为某类(或某乡镇)住房总间数;

$$b = \frac{s}{q} \times \frac{f}{r} \quad (2)$$

式中: $s$  为某结构住房损坏数量(或某乡镇住房损坏总数); $q$  为全部住房损坏总数; $f$  为全部住房总数; $r$  为某结构住房数量(或某乡镇住房数量)。

破坏指数  $b$  可以排除不同类型(或不同乡镇)住房总数差异的影响,更好地描述不同类型(或不同乡镇)住房的破坏程度。若  $b > 1$ ,则该类住房(或该乡镇住房)较其他类型的住房(或其他乡镇住房)更容易发生破坏;若  $b < 1$ ,则相反。

#### (2) 震中距对居民住房破坏程度的影响分析

本研究根据《泸州市灾损统计汇总表》,将震中距定义为乡镇人民政府到震中的平面直线距离,用不同模型对震中距和破坏指数  $b$  进行拟合。部分模型如下:

##### ① 线性拟合模型:

① 四川大学灾后重建与管理学院.泸县“9.16”地震综合调查评估服务.泸州:泸州市应急管理局,2021.

② 四川省泸州市减灾委.泸州市灾损统计汇总表.泸县:四川省泸州市减灾委,2022.

$$y = f(x; b_1, \dots, b_n);$$

## ② 多项式拟合模型:

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n;$$

## ③ 非线性拟合模型:

$$y = ax^b;$$

$$y = A_1 * \exp(-x/t_0) + y_0;$$

$$y = y_0 + A_1 e^{(x-x_0)/t_1}.$$

选取最佳拟合模型,分析震中距对居民住房损坏程度的影响。

## (3) 居民住房地震易损性矩阵构建

本研究将建立研究区不同类型居民住房在不同地震烈度下的易损性矩阵,将灾损数据按照不同烈度不同破坏等级对居民住房破坏比进行统计,由此得到不同结构的易损性矩阵。破坏等级分为四类,具体分类及含义如下:

**基本完好(含完好):**因灾未造成或造成居民住房结构主体和非主体轻微破坏,稍加修理即可继续使用;

**一般损坏:**因灾导致房屋多数承重构件轻微裂缝,部分明显裂缝;个别非承重构件严重破坏;需一般修理,采取安全措施后可继续使用;

**严重损坏:**因灾导致房屋多数承重构件严重破坏或部分倒塌,需采取排险措施、大修或局部拆除、无维修价值;

**倒塌:**因灾导致房屋整体结构塌落,或承重构件多数倾覆或严重损坏,必须进行重建。

## (4) 与其他区域居民住房破坏程度对比

将《中国地震烈度表(GB/T 17742—2020)》<sup>[16]</sup>提供的标准数据及其他地震相关计算结果与此次地震进行对比,以探讨研究区的特殊性。其中,《中国地震烈度表(GB/T 17742—2020)》评定烈度的房屋

类型有五类:A1类为未经抗震设防的土木、砖木、石木等房屋;A2类为穿斗木架构房屋;B类为未经设防的砖混结构房屋;C类为按照Ⅶ(7度)抗震设防的砖混结构房屋;D类为按照Ⅶ度(7度)抗震设防的钢筋混凝土框架结构房屋。本次地震砖木及其他结构居民住房可与上述的A1/A2类对应,砖混结构居民住房可与B/C类对应,钢混结构居民住房可与D类对应。

为了统一不同区域、不同地震造成的居民住房破坏程度,现用平均震害指数 $D^{[17]}$ 作为破坏程度的量化标准,其定义为同类型居民住房震害指数的加权平均值<sup>[18]</sup>,平均震害指数越大,居民住房破坏程度越高。计算公式如下:

$$D = \sum_{i=1}^4 d_i p_i \quad (3)$$

式中: $d_i$ 为居民住房破坏等级为 $i$ 时的震害指数; $p_i$ 为破坏等级为 $i$ 时的居民住房破坏比。

其中震害指数是房屋震害程度的定量指标,以0.00~1.00表示由轻到重的震害程度<sup>[19]</sup>。与一般房屋损坏程度分级及震害指数区间进行对比得到此次地震各破坏等级对应的震害指数区间:基本完好为0.00~0.30;一般损坏为0.30~0.55;严重损坏为0.55~0.85;倒塌为0.85~1.00。计算时取各范围的中间值。

## 3 结果分析

### 3.1 不同乡镇和结构类型住房破坏程度

各乡镇住房损坏程度存在较大差异。从图2可以看出,居民住房损坏情况整体表现为距震中及华莹山断裂带较近的福集、玉蟾、嘉明、喻寺等乡镇(街道)较为严重,距华莹山断裂带较近但与震中稍远的

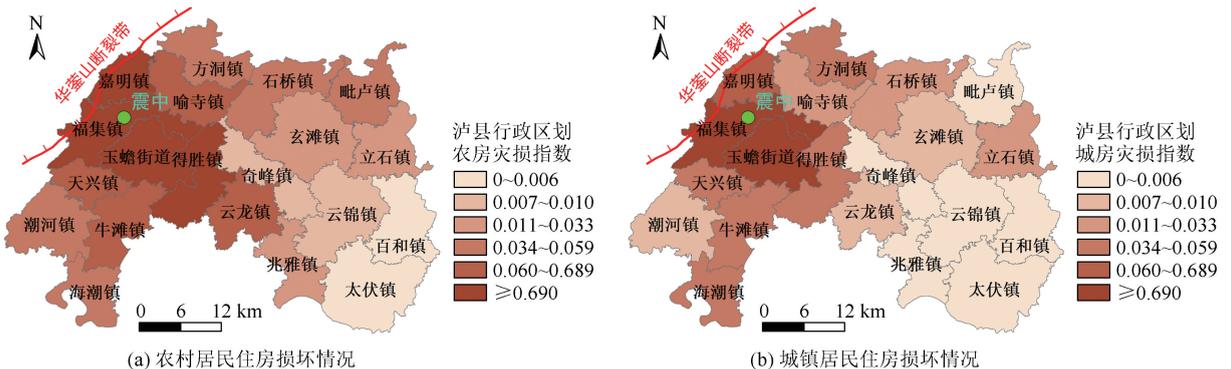


图2 泸县地震房屋损坏情况空间分布图[审图号:图川审(2016)027号]

Fig.2 The spatial distribution of earthquake house damage in Luxian County

得胜、天兴以及海潮等乡镇(街道)损坏情况次之,同时远离震中和华蓥山断裂带的太伏、百和等乡镇(街道)最轻。对比图 2(a)和(b)发现,福集镇和玉蟾街道的城镇和农村居民住房损坏程度都较重。此外,城镇居民住房受损程度整体较农村地区轻。

不同结构居民住房损坏情况存在较大差异,钢混结构易损性较低,砖混结构易损性较高,砖木及其他结构居中。据表 1 可知,城镇地区,除少数石砌等其他结构住房倒塌 5 间外,钢混、砖混及砖木结构住

房未发生倒塌;砖混结构住房有 3 066 间发生严重损坏,29 739 间发生一般损坏,损坏数量最多。农村地区的倒塌破坏数量明显较城镇地区多,除钢混结构外,其余结构住房都有不同程度的倒塌,石砌等其他结构倒塌数量最多为 105 间,砖木结构倒塌 54 间,远高于砖混结构 13 间;在严重损坏和一般损坏中,砖混结构住房损坏数量最多,约 4 万间,砖木结构破坏数量超 2 万间。砖木及其他结构倒塌数量较多可能与其结构整体性较差及结构本身抗震能力弱有关。

表 1 泸县地震不同房屋结构破坏情况表

Table 1 Table of different housing structures damaged by the earthquake in Luxian County

地区	结构类型	房屋结构破坏数/间			破坏指数 (b)	破坏指数 占比/%
		倒塌	严重损坏	一般损坏		
城镇	钢混结构	0	0	0	0	0
	砖混结构	0	3 066	29 739	2.57	75.5
	砖木结构	0	1 105	962	0.21	6.3
	其他结构	5	459	4 445	0.62	18.2
农村	钢混结构	0	0	0	0	0
	砖混结构	13	10 835	21 681	1.78	46.5
	砖木结构	54	6 701	19 750	1.52	39.8
	其他结构	105	3 228	5 363	0.53	13.7

城镇地区砖混结构破坏指数  $b$  为 2.57,比农村地区(1.78)高,占城镇总体比例 75.5%,是损坏程度较高的结构类型,这可能与其建造不规范及建造年份久远等有关;农村地区砖木结构  $b > 1$ ,破坏指数占比 39.8%,城镇地区砖木结构  $b < 1$ ,破坏指数占比为 6.3%,因此,农村地区砖木结构居民住房破坏程度较城镇高,可能与农村地区监管难度较大导致砖木结构建造不规范有关;对于钢混结构,农村和城镇地区破坏指数  $b$  均小于 1,破坏指数占比也接近 0,破坏程度相对较低,与其结构耐久性强和整体性

较好有关。

### 3.2 震中距与居民住房损坏程度的关系

基于研究区各乡镇(街道)居民住房破坏指数  $b$  与震中距,运用多种模型对两者进行拟合,发现指数函数模型(ExpDecl)对各结构的拟合效果最佳,拟合结果的相关系数( $R^2$ )砖混结构为 0.86,砖木结构为 0.91,其他结构为 0.54,前两者拟合效果较好,因其他结构中包含了土木、木结构等多种结构,拟合效果稍差但整体趋势与砖混及砖木结构一致。拟合方程如表 2 所列。

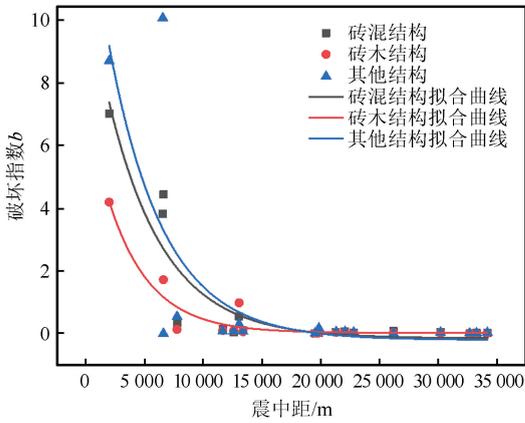
表 2 各结构拟合曲线参数表

Table 2 Table of parameters for each structure fitting curve

模型方程	ExpDecl		
	$y=A_1 * \exp(-x/t_0)+y_0$		
绘图	砖混结构	砖木结构	其他结构
$y_0$	$-0.16 \pm 0.27$	$0.016 45 \pm 0.103 16$	$-0.21 \pm 0.71$
$A_1$	$11.44 \pm 1.61$	$7.34 \pm 0.98$	$14.36 \pm 4.41$
$t_0$	$4 775.71 \pm 880.83$	$3 554.1 \pm 617.36$	$4 691.14 \pm 1 878.10$
$R^2$	0.858 35	0.906 38	0.543 06

从拟合结果(图 3)可以看出:整体趋势上,随震中距的增加,各乡镇(街道)居民住房的损坏程度呈指数下降。对三种结构曲线的斜率进行分析发现:砖混、砖木及其他结构的拟合曲线斜率分别在震中距 6 602.98 m、4 731.61 m 及 5 505.97 m 时发生突变,说明各种结构住房的损坏情况主要集中在这三

个范围内,且砖木结构发生损坏的范围最小,主要集中在福集镇及玉蟾街道;其次为砖混及其他结构,主要集中在福集镇、玉蟾街道及嘉明镇。计算上述三个乡镇(街道)的破坏指数  $b$  分别为 6.12、6.40 及 3.42,发现 90%左右的居民住房损坏集中在震中距 6 602.98 m 以内的区域,与此次地震烈度图 VIII 度区域

图3 破坏指数  $b$  与震中距的函数关系图Fig.3 Plot of damage index  $b$  as a function of epicenter distance

基本重合;当震中距分别为 15 185.45 m、10 765.15 m 及 16 056.60 m 时,各结构拟合曲线斜率趋于平缓,在这之后大多数乡镇(街道)破坏指数  $b < 1.0$ ,损坏程度较低且此范围基本介于地震烈度图的Ⅶ及Ⅷ区域之间。

### 3.3 居民住房的地震易损性矩阵

从不同地震烈度和不同结构两个维度来建立泸县地震易损性矩阵,结果如表 3 所列。此次地震总体破坏程度较小,居民住房发生倒塌的情况较少,多为基本完好或发生一般损坏。在地震烈度低于Ⅶ度,农村和城镇地区各种结构居民住房破坏比较小,多为基本完好,未发生严重损坏。随地震烈度增大,各结构破坏比有一定增大,在地震烈度为Ⅷ度时,农

表 3 居民住房地震易损性矩阵(单位:%)

Table 3 Seismic vulnerability matrix of residential housing (Unit: %)

地区	结构类型	损坏等级	地震烈度			
			V	VI	Ⅶ	Ⅷ
农村	砖混结构	基本完好	99.934	99.777	97.205	61.356
		一般损坏	0.063	0.209	2.139	25.066
		严重损坏	0.003	0.015	0.656	13.560
		倒塌	0.000	0.000	0.000	0.018
	砖木结构	基本完好	99.982	99.919	98.051	69.013
		一般损坏	0.014	0.066	1.664	22.766
		严重损坏	0.004	0.015	0.286	8.172
		倒塌	0.000	0.000	0.000	0.049
	其他结构	基本完好	99.968	99.893	99.472	89.848
		一般损坏	0.029	0.071	0.324	6.237
		严重损坏	0.003	0.036	0.177	3.818
		倒塌	0.000	0.000	0.027	0.097
城镇	砖混结构	基本完好	99.968	99.909	99.410	70.625
		一般损坏	0.032	0.091	0.558	26.607
		严重损坏	0.000	0.000	0.032	2.768
		倒塌	0.000	0.000	0.000	0.000
	砖木结构	基本完好	99.997	99.945	99.979	96.010
		一般损坏	0.003	0.055	0.021	1.783
		严重损坏	0.000	0.000	0.000	2.207
		倒塌	0.000	0.000	0.000	0.000
	其他结构	基本完好	100.000	99.928	99.946	84.977
		一般损坏	0.000	0.072	0.016	13.654
		严重损坏	0.000	0.000	0.038	1.353
		倒塌	0.000	0.000	0.000	0.015

村砖混结构住房主要出现一般损坏(25.06%)和严重损坏(13.56%);22.76%的砖木结构居民住房发生一般损坏,钢混等其他结构破坏比较小。城镇砖混结构居民住房主要发生一般损坏,占比达 26.6%,砖木、钢混等其他结构发生一般损坏和严重损坏的比例较低。总体上,城镇地区的破坏程度比农村低。

### 3.4 居民住房破坏程度的特征

表 4 为按照地震局所划烈度范围统计并计算得

到的泸县 6.0 级地震、2008 年攀枝花市 6.1 级地震<sup>[20]</sup>的平均震害指数及《中国地震烈度表(GB/T 17742—2020)》<sup>[16]</sup>给定的标准平均震害指数对应关系表。由于研究区 V、VI、Ⅶ度区域居民住房破坏程度较低,平均震害指数差异不明显,因此本文主要比较三者Ⅷ度区。通过对比可知:

(1) 两次地震震级相近,但同烈度情况下,2008 年攀枝花地震灾区房屋损坏程度总体较泸县地震严

重,钢混、砖混和砖木结构的平均震害指数要比泸县地震高 1~2 倍,破坏的结构类型亦表现出差异性,

攀枝花地震中砖木结构房屋的破坏程度最高,其次为砖混及钢混结构。

表 4 泸县、攀枝花地震及标准给定的平均震害指数表

Table 4 Table of Luxian and Panzhihua earthquakes and the average seismic damage index given by the standard

名称	结构类型	平均震害指数		
		Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ
2021 泸县 6.0 级地震	钢混结构	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	砖混结构	0.200 4	0.205 6	0.287 6
	砖木结构	0.200 2	0.203 7	0.249 3
	其他结构	0.200 3	0.201 4	0.232 9
2008 攀枝花 6.1 级地震	钢混结构	0.221 6	0.249 7	0.300 3
	砖混结构	0.248 8	0.356 9	0.565 4
	砖木结构	0.321 1	0.608 0	0.814 3
《中国地震烈度表》	A1	0.02~0.17	0.15~0.44	0.42~0.62
	A2	0.01~0.13	0.11~0.31	0.29~0.46
	B	0.00~0.11	0.09~0.27	0.25~0.50
	C	0.00~.16	0.05~0.18	0.16~0.25
	D	0.00~0.04	0.04~0.16	0.14~0.27

(2) 对比泸县地震和《中国地震烈度表》发现,研究区居民住房砖混结构平均震害指数为 0.29,符合标准中Ⅷ度区 B 类房屋平均震害指数的范围,高于 C 类房屋上限值 0.25,表明此次地震中部分砖混结构住房损坏程度较高;砖木及其他结构平均震害指数为 0.25 和 0.23,低于标准中Ⅷ度区 A2 类房屋下限值 0.29,其损坏程度偏低;钢混结构住房平均震害指数为 0,远低于标准中Ⅷ度区 D 类房屋下限值 0.14,钢混结构住房的易损性较低,抗震性能较好。

(3) 攀枝花地震各结构住房的平均震害指数均高于《中国地震烈度表》标准值,尤其是砖木结构(0.81)比 A2 类上限值 0.46 高出 1 倍,破坏程度最高,可能与攀枝花地震发生于 2008 年,当时的抗震设防标准及建造的要求较低,房屋整体的抗震水平较低有关。

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

相同地震烈度在盆地内部造成的居民住房破坏程度较山区更小,可能原因之一是山区地形陡峭,地震动加速度高程放大效应明显,且建筑物多建造在山坡、边坡、陡坎等地形下,受到了场地效应的影响<sup>[21]</sup>,这种不利地形条件可能导致地基不稳,从而产生更严重的破坏情况;而盆地内部绝大部分属丘陵地带,地势相对平坦,地形条件较好,房屋破坏程度也较低。其次,两次地震发生的时间差异较大,在 2008 年汶川地震之后,新的国家标准开始实行,因此泸县新建的住房抗震能力更强。

然而,此次地震仍然体现出一些值得关注的问题。例如,农村住房比城镇住房破坏程度更高、砖混结构房屋破坏问题突出、砖木等其他结构倒塌数量多,其主要原因在于居民自建房建设的不规范。由于研究区现存居民自建房多为 20 世纪初至 90 年代修建<sup>[22]</sup>,虽多采取砖混结构修建,但受限于当时经济条件和政策监管程度,多未经过正规设计,普遍缺乏必要的构造柱、圈梁等防震结构<sup>[23]</sup>,因而抗震性能表现不佳。农村地区居民自建房更为普遍,且监管更为宽松,因此这一现象更加突出。砖木结构是墙体和木结构共同承担荷载的结构形式,因其屋盖和墙体之间连接较弱<sup>[22]</sup>,住房整体性较差,倒塌数量较多。其他结构倒塌数量较多主要与土木、石砌等结构本身易损性较高有关。而钢混结构住房由于修建年代相对较晚,修建更为规范,加之本身抗震结构完备<sup>[24]</sup>,在此次地震中几乎未出现明显的结构损伤。目前,随着当前经济发展和监管审批措施的逐渐完善,自建住房结构不规范、抗震性能差的现象逐年减少,但在四川盆地该类居民自建房的存量仍然较大,这一问题值得关注。

### 4.2 结论及建议

通过对泸县地震中居民住房破坏程度的影响因素分析,并对盆地和山区相似震级地震进行对比,进而探讨居民住房破坏程度的特征及原因,以期为四川盆地灾区进行快速震损评估、规划和重建过程中居民住房抗震性能的提升等方面提供参考。

研究表明:

(1) 此次地震居民住房损坏程度总体上较小且

城镇损坏程度比农村低。居民住房结构易损性从高到低为:砖混结构、砖木结构及其他结构(土木、木、石砌结构)、钢混结构。其中,砖混结构建设不规范、抗震结构缺失,砖木及其他结构倒塌情况较为严重的问题值得关注。针对灾后重建,此次地震钢混结构的破坏程度很低,出现轻微裂缝或承重柱外层装饰破坏等现象,稍加修复即可;砖混及砖木结构出现整体倒塌、墙体开裂等现象,可采用型钢格构柱对承重柱进行加固,对承载力较弱的墙面新增混凝土板进行修缮<sup>[25]</sup>,对不能进行修缮的房屋应采用稳定性较高的钢混等结构进行重建。

(2) 居民住房损坏程度随着震中距的增加呈指数下降趋势,此次地震中 90% 的损坏出现在震中距 6 600 m 以内的区域,表明在四川盆地内部,类似震级地震对房屋产生的破坏主要在 10 km 这一量级,在此范围内应严格审查并根据《建筑工程抗震设防分类标准(GB 50223—2017)》<sup>[26]</sup>及《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》<sup>[27]</sup>等进行房屋建设。

(3) 不同区域震后住房的平均震害指数与《中国地震烈度表》标准范围存在差异。受不同区域地理条件差异和经济发展水平的影响,比较同震级两次地震发现,在盆地对居民住房造成的损坏比山地低 1~2 倍,因此针对不同地区房屋易损性进行针对性的研究有较强的现实意义。

## 参考文献(References)

- [1] KASSEM M M, MOHAMED NAZRI F, NOROOZINEJAD FARSANGI E. The seismic vulnerability assessment methodologies: a state-of-the-art review[J]. *Ain Shams Engineering Journal*, 2020, 11(4): 849-864.
- [2] 文世勇, 赵冬至, 张丰收, 等. 赤潮灾害风险评估方法[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(1): 106-111.  
WEN Shiyong, ZHAO Dongzhi, ZHANG Fengshou, et al. Risk assessment method of harmful algal bloom hazard[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(1): 106-111.
- [3] 徐超, 温增平. 不同设防标准 RC 框架结构基于易损性分析的抗震性能评估[J]. *震灾防御技术*, 2017, 12(4): 845-857.  
XU Chao, WEN Zengping. Seismic performance evaluation of RC frames with different seismic precautionary intensity based on vulnerability analysis[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2017, 12(4): 845-857.
- [4] 涂伟荣, 谭平, 周福霖, 等. 房屋建筑抗震易损性分析方法研究综述[J]. *华南地震*, 2011, 31(1): 47-54.  
TU Weirong, TAN Ping, ZHOU Fulin, et al. State-of-art of seismic fragility analysis methods for building structure[J]. *South China Journal of Seismology*, 2011, 31(1): 47-54.
- [5] KARIMZADEH S, MIYAJIMA M, HASSANZADEH R, et al.

- A GIS-based seismic hazard, building vulnerability and human loss assessment for the earthquake scenario in Tabriz[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2014, 66: 263-280.
- [6] 贾哈曦, 林均岐, 刘金龙. 建筑结构地震易损性分析研究综述[J]. *震灾防御技术*, 2019, 14(1): 42-51.  
JIA Hanxi, LIN Junqi, LIU Jinlong. Review of seismic fragility analysis of building structure[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2019, 14(1): 42-51.
- [7] TANIGUCHI H. Estimation of damage caused by earthquake and its application to the seismic risk assessment in Nagoya City, Japan[J]. *Bulletin of Aichi Institute of Technology (Part B)*, 1985, 20: 195-208.
- [8] TSAI P H, D'AYALA D. Performance-based seismic assessment method for Taiwanese historic Dieh-Dou timber structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2011, 40(7): 709-729.
- [9] 吕大刚, 李晓鹏, 王光远. 基于可靠度和性能的结构整体地震易损性分析[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(2): 107-114.  
LÜ Dagang, LI Xiaopeng, WANG Guangyuan. Global seismic fragility analysis of structures based on reliability and performance[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(2): 107-114.
- [10] 吕大刚, 王光远. 基于可靠度和灵敏度的结构局部地震易损性分析[J]. *自然灾害学报*, 2006, 15(4): 157-162.  
LÜ Dagang, WANG Guangyuan. Local seismic fragility analysis of structures based on reliability and sensitivity[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2006, 15(4): 157-162.
- [11] HASSANINIA M, AJALLOEIAN R, HABIBI M R. Seismic microzonation and building vulnerability assessment based on site characteristic and geotechnical parameters by use of Fuzzy-AHP model (a case study for Kermanshah City)[J]. *Civil Engineering and Environmental Systems*, 2019, 36(2/3/4): 172-198.
- [12] 孙柏涛, 张桂欣. 汶川 8.0 级地震中各类建筑结构地震易损性统计分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(5): 26-30.  
SUN Baitao, ZHANG Guixin. Statistical analysis of the seismic vulnerability of various types of building structures in Wenchuan M8.0 earthquake[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(5): 26-30.
- [13] 姚新强, 孙柏涛, 刘芳, 等. 天津安居抗震能力分布研究[J]. *自然灾害学报*, 2017, 26(6): 32-38.  
YAO Xinqiang, SUN Baitao, LIU Fang, et al. Study on distribution of seismic capacity of Tianjin rural residence[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2017, 26(6): 32-38.
- [14] 李欣蔚, 张广伟, 谢卓娟, 等. 2021 年四川泸县 M6.0 地震发震机理及地震活动时空演化特征[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(11): 4284-4298.  
LI Xinwei, ZHANG Guangwei, XIE Zhuojuan, et al. Seismogenic mechanism of the 2021 M6.0 Luxian earthquake and seismicity spatio-temporal characteristics around the source region[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(11): 4284-4298.
- [15] 国务院人口普查办公室. 中国 2010 年人口普查资料[M]. 北

- 京:中国统计出版社,2012.
- Census Office of the State Council.Tabulation on the 2010 population census of the People's Republic of China[M].Beijing:China Statistics Press,2012.
- [16] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.中国地震烈度表:GB/T 17742—2020[S].北京:中国标准出版社.
- State Administration for Market Regulation of the People's Republic of China,Standardization Administration of the People's Republic of China.The Chinese seismic intensity scale:GB/T 17742—2020[S].Beijing:Standards Press of China,2020.
- [17] 冯志泽.应用房屋震害指数进行地震灾害损失评估[J].西北地震学报,1997,19(1):92-93.
- FENG Zhize.Assessing the seismic disaster loss by using earthquake hazard index of buildings[J].Northwestern Seismological Journal,1997,19(1):92-93.
- [18] 田得元.农村建筑区域特点及典型结构地震易损性分析[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2021.
- TIAN Deyuan.Regional characteristics of rural buildings and seismic vulnerability analysis of typical structures[D].Harbin:Institute of Engineering Mechanics,China Earthquake Administration,2021.
- [19] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988.
- HU Yuxian.Earthquake engineering[M].Beijing:Seismological Press,1988.
- [20] 晁忠贵,方冬慧,王清远,等.攀枝花里氏 6.1 级地震建筑震害调查与分析[J].四川建筑科学研究,2009,35(5):115-119.
- CHAO Zhonggui,FANG Donghui,WANG Qingyuan,et al.Investigation and analysis of building damage of Panzhihua  $M_s$ 6.1 earthquake[J].Sichuan Building Science,2009,35(5):115-119.
- [21] BIRD J F,BOMMER J J.Earthquake losses due to ground failure[J].Engineering Geology,2004,75(2):147-179.
- [22] 潘毅,易督航,游文龙,等.泸县 6.0 级地震村镇建筑震害调查与分析[J].土木工程学报,2023,56(5):47-59.
- PAN Yi,YI Duhang,YOU Wenlong,et al.Seismic damage investigation and analysis of rural buildings in  $M_s$ 6.0 Luxian earthquake[J].China Civil Engineering Journal,2023,56(5):47-59.
- [23] 鲁若帆,张令心,李行,等.基于地震易损性分析的构造柱设置对砖砌体房屋抗震性能影响研究[J].建筑结构学报,2022,1-13[2023-03-09].https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0167.
- LU Ruofan,ZHANG Lingxin,LI Xing et al.Effects of constructional columns on the seismic performance of brick masonry buildings based on fragility analysis[J].Journal of Building Structures,2022,1-13[2023-03-09].https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0167.
- [24] 冯远,刘兰花,易勇,等.多层钢筋混凝土框架柱震害调查分析与启示[J].土木工程学报,2010,43(10):63-72.
- FENG Yuan,LIU Lanhua,YI Yong,et al.Seismic damages of frame columns in multi-storey reinforced concrete buildings: investigation and learning[J].China Civil Engineering Journal,2010,43(10):63-72.
- [25] 常路新,霍喆赞,魏子丹,等.复杂砖混结构鉴定及抗震加固案例分析[J].建筑结构,2022,52(增刊 1):2039-2043.
- CHANG Luoxin,HUO Zheyun,WEI Zidan,et al.Case analysis of safety appraisal and seismic reinforcement of a complex brick-concrete structure[J].Building Structure,2022,52(Suppl01):2039-2043.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑工程抗震设防分类标准:GB 50223—2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China.Standard for classification of seismic protection of building constructions:GB 50223—2008[S].Beijing,China Architecture & Building Press,2008.
- [27] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.建筑抗震设计规范:GB 50022—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the Public of China,General Administration of Quality Supervision,Inspection and Quarantine of the People's Republic of China.Code for seismic design of buildings:GB 50011—2010.Beijing:China Architecture & Building Press,2010.

(本文编辑:张向红)