

郑逸, 宴金旭, 王婧颖, 等. 四川穿斗木构架房屋典型震害特征分析[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 106–115. [ZHENG Yi, YAN Jinxu, WANG Jingying, et al. Typical Seismic Damage Characteristics of Traditional Chuan-Dou Style Wood Frame Houses in Sichuan Province [J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 106–115]

四川穿斗木构架房屋典型震害特征分析

郑逸, 宴金旭, 王婧颖, 毛利, 肖术连, 格桑扎西

(四川省地震局, 成都 610041)

摘要: 在四川穿斗木构架房屋震害资料的基础上, 对区域内的穿斗木构架房屋进行地震易损性评估, 同时, 通过梳理历史震例, 归纳总结出穿斗木构架房屋的典型震害特征, 旨在为提升四川穿斗木构架房屋的抗震性能提供建议和参考。

关键词: 四川穿斗木构架房屋; 地震易损性评估; 典型震害特征

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0106-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.12

Typical Seismic Damage Characteristics of Traditional Chuan-Dou Style Wood Frame Houses in Sichuan Province

ZHENG Yi, YAN Jinxu, WANG Jingying, MAO Li, XIAO Shulian, GESANG Zhaxi

(Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the seismic damage data of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province, this paper carried out a seismic vulnerability evaluation on traditional Chuan-Dou style wood frame houses within the study area. It also sorted out historical seismic events and summarized the typical seismic damage characteristics of traditional Chuan-Dou style wood frame houses, so as to provide advice and references for improving the seismic performance of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province.

Keywords: Traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province; Seismic vulnerability evaluation; Typical seismic damage characteristic

收稿日期: 2024-03-27

基金项目: 四川省地震局地震科技专项(LY2306)

作者简介: 郑逸(1988-), 女, 工程师, 主要研究方向为地震应急。

E-mail: 413233980@qq.com

通信作者: 宴金旭(1989-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为地震应急。

E-mail: 939986413@qq.com

0 引言

穿斗木构架是四川传统民居的主要结构形式,从川东南丘陵到川西山地高原,顺应当地自然环境,就地取材,构造做法较为简单灵活,同时,不同区域的穿斗木构架房屋在构造和装饰上均表现出相应的地域特色,是四川地区古代建筑艺术和技术的集中体现,具有较高的研究价值。

穿斗木构架房屋一般建造年代较早,工匠设计水平不高,且没有相关规范技术文件指导,房屋的建造质量主要由工匠的经验决定,在地震中常呈现出多样的震害特征。国内外学者已对木结构建筑的结构性能和震害特征作了诸多研究,谷军明^[1]指出穿斗式木结构具有良好的抗震性能,但在地震中也出现木构架破坏、房屋整体倾斜倒塌等破坏形式,谢启芳^[2]根据传统木结构建筑在汶川地震中的震害情况,对木结构建筑抗震机理进行了研究,Seo等^[3]研究总结出梁柱节点在地震作用下的主要破坏形式, Maeno^[4]通过振动台试验,发现其抗弯作用所产生的恢复力特性在传统木建筑的结构受力体系中的重要作用。此外,为提高木结构建筑抗震性能,学者进行了加固修缮方法的研究,段春辉^[5]针对木结构自身存在的缺陷提出相应的加固方法,柯吉鹏^[6]针对木结构古建筑的破坏特点,提出运用新材料、新技术的现代加固方法, A.Borri等^[7]通过试验证明,使用高强度钢绞线加固后的木梁,其强度和抗弯刚度有很大程度提高, Yail J Kim^[8]通过试验表明采用CFRP加固法后,木梁的承载力和延展性分别提高了184%和165%。

目前,学者大多研究某次地震中穿斗木构架房屋的破坏情况,针对不同地震对穿斗木构架房屋造成破坏的整体情况进行的研究较少,此外,部分穿斗木构架房屋虽不再用于居住,作为历史文化的载体,其价值不可忽视,将穿斗木构架房屋作为特色传统民居进行加固修缮的研究较为欠缺,且许多现有的加固方法更适用于城市建筑,无法满足村镇建筑的需求。四川境内存在大量穿斗木构架房屋,同时,作为地震多发区,区域内的穿斗木构架房屋通常遭受不同程度的破坏,表现出多样的震害现象,为本文提供了研究基础。

基于以上,本文结合四川地区的历史震例和震害资料,对区域内穿斗木构架房屋的典型震害特征进行研究,以期提升穿斗木构架房屋的抗震性能

提供参考。

1 四川穿斗木构架房屋概况

四川地区穿斗木构架房屋多采用天然木材制作而成,其主体架构为“穿斗式”木屋架,房屋自重轻,各节点采用榫卯结构连接,整体性较好^[9]。房屋特点可总结为“穿枋过柱,斗成房架”,木构架承重,墙体作围护。

四川穿斗木构架房屋主要分布在川东南地区和川西地区,川北地区穿斗木构架房屋少,其结构与川东南地区穿斗木构架房屋一致,在此不单独列举。川东南地区多丘陵,森林资源较丰富,取材方便,区域内存在大量的穿斗木构架民,其结构沿房屋的进深方向按檩数立一排柱,每柱上架一檩,檩上布椽,屋面荷载直接由檩传至柱,每排柱子靠穿透柱身的穿枋横向贯穿起来,成一榀构架,每两榀构架之间使用斗枋和纤子连接起来,形成一间房间的空间构架。根据房屋的大小,可使用“三檩三柱一穿”、“五檩五柱二穿”、“十一檩十一柱五穿”等不同构架。早年修建的房屋以竹编夹泥墙作围护墙,此外,还有木板墙和砌体墙等围护墙,为适应四川多雨水的气候,屋面多为人字形,铺设小青瓦,房屋整体结构较为灵活轻盈(如图1所示)。

川西地区地形以山地高原为主,除了传统的穿斗木构架房屋,在甘孜藏族自治州和阿坝藏族羌族自治州,尤其是汉藏混居区域,还存在一种“藏式穿斗木构架”房屋,穿斗木架通柱、双梁双檩双挂条,地扞锁脚井字形屋架,房屋的大小以“空”为单位计数,四柱之间为一“空”,小者十余“空”,大者达八十“空”,采用片石块石或夯土作围护墙,屋面、墙体多装饰,房屋整体较厚重(如图2所示)。

川东南地区的传统穿斗木构架房屋空间紧凑,柱子细而密,选用木料轻,木框架整体较轻,川西地区的“藏式穿斗木构架”房屋空间开阔,柱间距较远,选用木料粗,木框架整体较重,两个地区的房屋承重系数和承重体系基本一致,主要差异在于原材料和建筑风格。川东南地区的传统穿斗木构架房屋一般采用杉木制作,檐下空间可用作避雨或社交闲谈;川西地区的“藏式穿斗木构架”房屋一般采用柏木等木材制作房屋屋面以及立面有木制藏式雕花装饰。



竹编夹泥墙围护墙



外屋架



檐下结构



内屋架

图1 川东南地区穿斗木构架房屋

Fig.1 Traditional Chuan-Dou style wood frame house in southeastern Sichuan Province



夯土围护墙



片石围护墙



梁柱节点



木柱浮放

图2 川西地区穿斗木构架房屋

Fig.2 Traditional Chuan-Dou style wood frame house in western Sichuan Province

2 四川穿斗木构架房屋典型震害特征分析

2.1 房屋地震易损性研究

根据中国地震台网中心发布的地震信息,2008—2022年,四川省共计发生 $M_s5.0$ 级及以上地震

33次。其中,以下地震对穿斗木构架房屋造成了破坏(如表1所示)。

本节在上述12次 $M_s5.0$ 级及以上地震震害资料的基础上,采用经验统计法研究四川穿斗木构架房屋的地震易损性,由于四川穿斗木构架房屋与其他房屋结构相比数量较少,震害损失抽样调查点的房屋数量有限,不按照川东南地区和川西地区分区进行易损性研究。

表1 M_s5 级及以上造成四川穿斗木构架房屋破坏的震例		
Table 1 Earthquakes with $M_s\geq5$ causing damage to traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province		
序号	时间/年	地震/ M_s
1	2008	汶川8.0级地震
2	2011	炉霍5.3级地震
3	2013	白玉5.3级地震
4		芦山7.0级地震
5	2014	康定6.3级地震
6	2017	九寨沟7.0级地震
7		青川5.4级地震
8	2019	长宁6.0级地震
9	2021	泸县6.0级地震
10	2022	芦山6.1级地震
11		马尔康6.0级地震
12		泸定6.8级地震

注:数据来源于四川省地震局地震现场工作组

《地震现场工作 第四部分:灾害直接损失评估》(GB/T18208.4-2011)规定,木结构为简易房屋,将其划分为基本完好、破坏(合并中等破坏和轻微

破坏),毁坏(合并严重破坏和毁坏)三种破坏等级,统计得出四川地区穿斗木构架房屋在Ⅵ~Ⅸ烈度下这三种破坏等级的破坏面积,如表2所示。

表2 2008年至今 M_s5 级及以上地震四川穿斗木构架房屋破坏面积					
Table 2 Damage areas of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuanin caused by earthquakes with $M_s\geq5$ since 2008					
地震烈度	序号	地震事件/ M_s	不同破坏状态下的房屋面积/(m^2)		
			基本完好	破坏	毁坏
Ⅵ	1	汶川8.0级地震	220 098	128 705	20 285
	2	炉霍5.3级地震	79 101	19 673	0
	3	白玉5.4级地震	540 452	129 834	0
	4	芦山7.0级地震	450 982	132 453	0
	5	康定6.3级地震	266 816	255 104	118 080
	6	九寨沟7.0级地震	872 886	287 087	0
	7	青川5.4级地震	1110 085	82 400	0
	8	长宁6.0级地震	1 975 183	338 198	76 724

(转下表)

(接表2)

地震烈度	序号	地震事件/ M_s	不同破坏状态下的房屋面积/(m^2)		
			基本完好	破坏	毁坏
Ⅶ	9	泸县6.0级地震	587 603	173 246	0
	10	芦山6.1级地震	436 725	153 482	0
	11	马尔康6.0级地震	468 931	152 248	0
	12	泸定6.8级地震	571 398	247 335	0
	1	汶川8.0级地震	591 135	318 473	144 544
	2	炉霍5.3级地震	40 195	22 623	1443
	3	白玉5.4级地震	70 666	37 889	1108
	4	芦山7.0级地震	386 972	174 350	0
	5	康定6.3级地震	2 610 984	807 762	91 790
	6	九寨沟7.0级地震	1 967 774	705 833	0
	7	长宁6.0级地震	157 970	152 714	22 297
	8	泸县6.0级地震	67 245	36 247	0
Ⅷ	9	芦山6.1级地震	59 980	38 825	0
	10	马尔康6.0级地震	51 786	37 218	0
	11	泸定6.8级地震	63 281	58 794	0
	1	汶川8.0级地震	540	53 460	134 690
	2	芦山7.0级地震	311 746	127 980	4355
	3	康定6.3级地震	237 889	462 431	246 313
	4	九寨沟7.0级地震	690 094	374 181	4808
	5	长宁6.0级地震	2913	34 521	20 602
	6	泸县6.0级地震	78 623	44 671	5270
Ⅸ	7	芦山6.1级地震	68 945	34 992	3286
	8	马尔康6.0级地震	49 982	41 249	6487
	9	泸定6.8级地震	37 762	58 973	7964
	1	汶川8.0级地震	0	23 860	152 860
	2	芦山7.0级地震	0	17 624	39 285
	3	九寨沟7.0级地震	0	93 240	99 645
	4	泸定6.8级地震	27 318	524 311	398 746

注:数据来源于四川省历年地震灾害损失评估报告和灾害调查报告

使用以下公式计算四川穿斗木构架房屋的地震易损性矩阵:

$$P[D_j|I]=\frac{\sum_{k=1}^NA_{k[D_j|I]}}{\sum_{k=1}^NA_{k|I}}$$

(1)

式(1)中, D_j 表示四川穿斗木构架房屋的三种破坏状态, 由 $j=1, 2, 3$ 表示, K 表示某次地震, N 是地震样本数, I 表示地震烈度, A 表示房屋面积。

计算得出四川穿斗木构架房屋地震易损性矩阵, 结合中国地震烈度表(GB/T 17742-2020), 取各烈度对应的PGA数值, 列出烈度、峰值加速度与地震易损性矩阵的关系, 结果如表3所示。

利用对数正太分布函数, 结合地震动参数PGA对房屋的破坏概率分布进行拟合^[10], 得出地震易损性曲线, 如图3所示。

表3 烈度、峰值加速度与四川穿斗木构架房屋地震易损性关系矩阵
Table 3 Relationship matrix between seismic intensity, peak acceleration and seismic vulnerability of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province

烈度	PGA/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	破坏等级		
		基本完好	破坏	毁坏
Ⅵ	0.653	76.78	21.15	2.07
Ⅶ	1.35	63.08	33.97	2.95
Ⅷ	2.79	21.39	57.51	21.10
Ⅸ	5.77	1.93	39.46	58.62

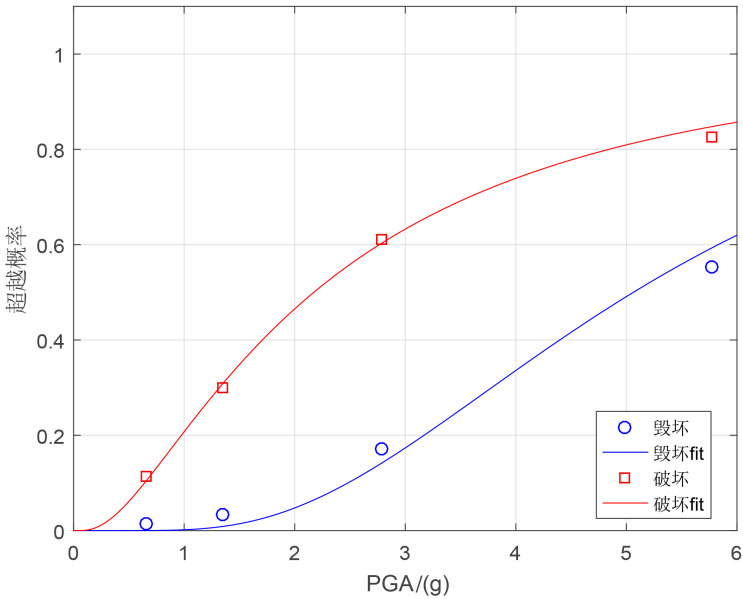


图3 四川穿斗木构架房屋地震易损性曲线
Fig.3 Seismic vulnerability curve of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in Sichuan Province

随着地震动参数的增强，超越破坏的概率高于超越毁坏的概率，Ⅵ度区和Ⅶ度区的穿斗木构架房屋基本完好，少数破坏；Ⅷ度区和Ⅸ度区的穿斗木构架房屋多数破坏，少数毁坏。下文将对其震害现象及成因进行具体分析。

2.2 四川穿斗木构架房屋典型震害及成因分析

针对地震灾害特征分析，其中一个思路是基于现场灾害调查资料进行综合分析^[11-12]，本节选取上述12次 M_s5 级及以上四川震例作为研究基础，根据《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)， M_s5 级及以上地震划分为Ⅵ度、Ⅶ度、Ⅷ度和Ⅸ度四个烈度区，其中，Ⅵ度区和Ⅶ度区属于低烈度区，Ⅷ度区和Ⅸ度区属于高烈度区，下文分别列举低烈度区和高烈度区房屋的典型震害现象，并

进行成因分析。
2.2.1 木构架的震害分析
(1)木构架整体破坏情况。木构架作为承重体系，本身抗震性能较好，大部分Ⅵ度区和Ⅶ度区的穿斗木构架房屋整体构架基本完好或歪斜，Ⅷ度区和Ⅸ度区破坏较为严重，区域内部分穿斗木构架房屋局部倒塌或完全倒塌(如图4、图5所示，分别选取2022年6月1日芦山6.1级地震和2013年4月20日芦山7.0级地震的震害照片)。
(2)木构件的破坏情况。木构件，即承重构件，包括柱、梁、枋、檩条，通过枋与柱、梁与柱、枋与梁、檩条与柱等连接方式，构成木构架，其中，檩条通常直接搁置在木柱上，两者无有效拉结，其他构件为榫卯连接。



Ⅵ度区木构架基本完好



Ⅶ度区木构架歪斜

图4 低烈度区穿斗木构架房屋整体破坏情况

Fig.4 Damage levels of Chuan-Dou style wood frame houses in low seismic intensity zone



Ⅷ度区木构架局部倒塌



Ⅸ度区木构架完全倒塌

图5 高烈度区穿斗木构架房屋整体破坏情况

Fig.5 Damage levels of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in high seismic intensity zone

Ⅵ度区和Ⅶ度区房屋的枋、檩条、少数作为主要承重构件的柱与梁出现轻微裂缝、榫卯节点轻微脱榫，Ⅷ度区和Ⅸ度区的房屋榫卯节点拔榫、枋或檩条折断、部分作为主要承重构件的柱与梁

断裂或折断(如图6、图7所示，分别选取2014年11月22日康定6.3级地震和2022年9月5日泸定6.8级地震的震害照片)。



Ⅵ度区木梁轻微裂缝



Ⅶ度区榫卯节点轻微脱榫

图6 低烈度区穿斗木构架房屋木构件的破坏情况

Fig.6 Damage levels of traditional Chuan-Dou style woodframe houses in low seismic intensity zone



Ⅷ度区横梁断裂



Ⅸ度区木柱折断

图7 高烈度区穿斗木构架房屋木构件的破坏情况

Fig.7 Damage levels of timber components of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in high seismic intensity zone

木构架存在以下薄弱环节:受木材老化、虫蛀和湿度等问题影响,木构件会腐朽、断裂或变形,榫卯节点受制于加工工艺,无加固措施,当木构件受损,节点易发生榫口松动、卯口开裂

2.2.2 围护墙的震害分析

围护墙典型震害特征包括开裂、外闪、倒塌。

Ⅵ度区和Ⅸ度区房屋的围护墙墙体出现轻微或较大裂缝,局部分层剥落,Ⅷ度区和Ⅸ度区房屋的围护墙墙体出现大面积坍塌或完全倒塌(如图8、图9所示,分别选取2013年1月8日白玉5.4级地震和2022年9月5日泸定6.8级地震的震害照片)。



Ⅵ度区墙体轻微裂缝



Ⅶ度区墙体局部分层剥落

图8 低烈度区穿斗木构架房屋围护墙的破坏情况

Fig.8 Damage levels of filler walls of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in low seismic intensity zone



Ⅷ度区墙体大面积坍塌



Ⅸ度区墙体倒塌

图9 高烈度区穿斗木构架房屋围护墙的破坏情况

Fig.9 Damage levels of filler walls of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in high seismic intensity zone

围护墙存在以下薄弱环节:围护墙与木构架之间无拉结措施,地震时易与框架相互挤压和撞击,导致墙体开裂或倒塌。

2.2.3 屋面的震害分析

屋面典型震害特征包括梭瓦、溜瓦和塌陷。

Ⅵ度区和Ⅶ度区房屋的屋面轻微梭瓦或溜瓦较多,Ⅷ度区和Ⅸ度区的房屋屋面大面积溜瓦或塌陷(如图10、图11所示,分别选取2022年6月20日马尔康6.0级地震和2013年4月20日芦山7.0级地震的震害照片)。



Ⅵ度区屋面轻微梭瓦



Ⅶ度区屋面溜瓦较多

图10 低烈度区穿斗木构架房屋屋面的破坏情况

Fig.10 Damage levels of rooftops of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in low seismic intensity zone



Ⅷ度区屋面大面积溜瓦



Ⅸ度区屋面塌陷

图11 高烈度区穿斗木构架房屋屋面的破坏情况

Fig.11 Damage levels of rooftops of traditional Chuan-Dou style wood frame houses in high seismic intensity zone

屋面存在以下薄弱环节：屋面通常荷载大，房屋整体上重下轻，屋面与木构架缺乏固定措施，且瓦片直接搁置于檩条上，地震时容易脱落。部分安设装饰构件，增加了屋面重量，更易塌陷。

结合房屋地震易损性分析，得出：低烈度区的穿斗木构架房屋以非承重构件的屋面和围护墙破坏为主，木构架轻微受损，不影响其承重功能；高烈度区的穿斗木构架房屋屋面和围护墙破坏严重，此外，部分房屋的木构件节点失效、木构件破坏，导致木构架不再具备承重功能，以致房屋整体垮塌。总体而言，四川地区穿斗木构架房屋具有较好的抗震能力，基本能够做到“墙倒屋不塌”。

3 讨论与建议

通过对四川穿斗木构架房屋典型震害特征进行研究，基于房屋“小震不坏，中震可修，大震不倒”的抗震原则，考虑到四川穿斗木构架房屋的地域特色及历史文化价值，针对其薄弱环节，建议从以下方面进一步提升四川穿斗木构架房屋的抗震性能：

(1)注重低烈度区房屋的日常维护，针对高烈度区房屋承重构件损坏、榫卯节点拔榫、脱榫节点失效等震害现象，可采用FRP(纤维增强复合材料)提升木构件的强度和刚度、CFRP(碳纤维复合材料)加强木构件的承载力和延展性，同时，GFRP(碳纤维复合材料)可以对节点进行约束，增强节点受力性能。

(2)穿斗式木构架房屋一般纵向柱间距较大，尤其是大开间的“藏式穿斗式木构架”房屋，纵向抗侧刚度较差，可通过设置剪力撑或屋架斜撑提高房屋的整体稳定性及房屋的抗震能力。

(3)针对屋面，应注意清理维护，及时更换新瓦，同时采用轻型材料制作瓦件和装饰，减轻屋面整体重量。针对围护墙，应特别注意，按易损性从高到低来划分，石墙最易遭到破坏，其次是夯土墙、砖墙，最后是竹编夹泥墙和木板墙，尤其是“藏式穿斗式木构架”房屋，可引入水泥、砖砌体等材料代替夯土、毛石等传统材料，提升墙体的强度，同时增设围护墙和木柱间的拉结。

(4)尽量不破坏房屋初始形态及历史文化风貌，通过采用新型防蛀防潮措施、更换部分老旧木构件、使用强度较大的加固构件强化节点连接等措施，对百年老屋予以保留。

参考文献

- [1] 谷军明, 缪升, 杨海名. 云南地区穿斗木结构抗震研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2005, 18(12): 205-211.
- [2] 谢启芳, 薛建阳, 赵鸿铁. 汶川地震中古建筑的震害调查与启示[J]. 建筑结构学报, 2010, S(2): 18-23.
- [3] Seo J M, Choi I K. Static and cyclic behavior of wooden frames with tenon joints under lateral load[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(3): 344-349.
- [4] Maeno M, Suzuki Y. A study on bending moment resistance at column and beam joints of traditional wooden frame by full-scale tests[J]. Journal of Structural & Construction Engineering, 2006, 71(601): 113-120.

- [5] 段春辉,郭小东,吴洋. 基于残损特点的古建筑木结构修复加固[J]. 工程抗震与加固改造,2014,36(01):126-130.
- [6] 柯吉鹏. 古建筑的抗震性能与加固方法研究[D]. 北京:北京工业大学,2004.
- [7] Borri A, Corradi M. Strengthening of timber beams with high strength steel cords[J]. Composites Part B Engineering, 2011, 42(6):1480-1491.
- [8] Kim Y J, Hossain M, Harries K A. Cfrp strengthening of timber beams recovered from a 32 year old quonset: Element and system level tests[J]. Engineering Structures, 2013(57): 213-221.
- [9] 宴金旭,肖本夫,张露露,等. 云南漾濞 $M_s6.4$ 级地震土木结构房屋震害分析[J]. 华南地震,2021,41(03):71-75.
- [10] 叶肇恒,孟凡馨,杨璐遥. 基于震害资料的四川省藏式房屋地震易损性研究[J]. 华南地震,2019,39(1):40-45.
- [11] 张翼,宴金旭,赵雪慧,等. 四川泸定 $M_s6.8$ 地震灾害主要特征分析[J]. 中国地震,2023,39(01):1-20
- [12] 李健梅,贾源源,段博儒. 灾害链学术思想的提出及两个概念概述[J]. 地震工程学报,2020,42(06):1735-1738.