

# 基于已有地震的云南农居易损性矩阵分区研究<sup>\*</sup>

周洋, 明小娜<sup>✉</sup>, 杨健强, 卢永坤

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 建筑物易损性矩阵是震后房屋直接经济损失初评估的重要计算参数。根据地域特征, 把云南地区分为滇东北、滇西—滇西北以及滇南—滇西南地区, 基于1993—2017年57次破坏性地震的震害资料, 运用基于已有震害数据的经验分析法和经验震害矩阵完善的方法构建不同分区云南农居易损性矩阵; 再通过各种建筑破坏比概率和易损性指数分析不同建筑结构的抗震能力以及不同分区同类结构的抗震能力。结果表明: 土木结构和砖木结构具有较大的区域差异, 滇东北地区土木结构、砖木结构抗震能力最差; 砖混结构、框架结构抗震能力区域差异不明显。

**关键词:** 云南农居; 地域特征; 破坏比; 易损性矩阵

**中图分类号:** P315.94      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)02-0283-09

## 0 引言

易损性矩阵又称破坏概率矩阵, 用于表征某一类建筑群体在某一确定地震作用下发生不同破坏状态的概率分布。建立群体建筑易损性矩阵的常用方法有基于数据调查的经验分析法 (Casciati, Faravelli, 1989; 周光全等, 2007; 姚新强, 2016; 邱舒睿, 高惠瑛, 2015; 林皓鋆等, 2019) 和基于数值模拟的理论计算法 (孙柏涛等, 2018; 何志明, 陈清军, 2018; 于晓辉, 吕大刚, 2016)。经验分析法基于大量震害数据, 通过数理统计计算建筑群体在不同烈度区、不同破坏状态的概率分布。震害数据主要源于震后对建筑物破坏的实地调查, 较为客观地反映了房屋结构的抗震能力, 该方法在地震多发区较为适用。在地震少发区, 由于缺少震害数据, 则需先对单体建筑物按一定比例抽样, 计算其震害预测结果, 再根据单体与群体的关系得出同结构类型的群体易损性矩阵 (张桂欣等, 2018; 李静等, 2012)。由此可见, 经验分析法具有区域性和结

构专有性 (贾晗曦等, 2019)。

云南地区位于印度板块与欧亚板块中国大陆碰撞带东缘 (皇甫岗等, 2007), 地震频发, 丰富的震害资料为使用经验分析方法建立群体建筑易损性矩阵提供了条件。周光全等 (2007) 利用1993—2003年云南地区震害资料建立了云南房屋建筑震害矩阵, 用于震后房屋建筑地震直接经济损失初评估计算, 但其统计资料距今已有16年; 1993年至今, 云南省历史地震中最高烈度为IX度, 且仅有3例, 缺少X度破坏比, 综上所述, 云南地区各类房屋建筑的震害矩阵需补充完善。

2014年8月3日鲁甸6.5级地震与2014年10月7日景谷6.6级地震震级相当, 灾区农居均以砖木和土木结构为主, 其承重结构体系前者以抬梁式结构为主, 后者以穿斗木屋架结构为主, 导致房屋抗震能力差异较大 (和嘉吉等, 2015), 结合地域差异建立分区的易损性矩阵, 能更准确地反映区域内的房屋抗震能力。鉴于此, 本文结合云南地区的地域特征, 选取1993—2017年云南地区震害资料, 使用经验分析法计算各结构类型易损性矩阵, 再结合经验震害矩阵完善方法 (胡少卿

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2020-04-01.

基金项目: 大中城市地震灾害情景构建重点专项项目 (2017QJGJ05) 资助.

第一作者简介: 周洋 (1986-), 工程师, 主要从事地震烈度、损失评估工作. E-mail: 15877909192@163.com.

✉ 通讯作者简介: 明小娜 (1986-), 工程师, 主要从事地震烈度、损失评估和工程结构易损性研究.

E-mail: 378223651@qq.com.

等, 2007) 对其进行修正和补全, 得到云南不同分区农居易损性矩阵。

## 1 云南地域特征及农居结构特征

### 1.1 云南地域特征

云南省位于中国西南边陲, 辖 16 个地级行政区, 总人口 4 829 万, 人口密度 122.5 人/km<sup>2</sup>, 有 25 个少数民族, 人均生产总值约 3.7 万元 (云南省统计局, 2019)。地势西北高、东南低, 属山地高原地形, 气候基本属于亚热带和热带季风气候, 滇西北属高原山地气候, 海拔 1 000 ~ 3 500 m。在自然地理环境、人口密度和民族分布的基础上, 根据云南历史地震人员伤亡和分布情况, 云南省各类建筑物分布及抗震性能情况可将云南地区分为滇东北、滇西—滇西北、滇南—滇西南地区。

滇东北地区 (昭通市、寻甸县和会泽县) 人口密度最高, 约为云南省平均人口密度的两倍, 且人口分布集中于坝子、河谷地带, 少数民族以回族、苗族为主。滇东北北部倾向四川盆地, 南部属云贵高原主体, 区域内以山地构造地形为主, 地质灾害频发, 交通极为脆弱, 最低温 0 ℃, 最高温在 30 ℃ 以上。

滇西—滇西北地区 (大理州、丽江市、保山市、迪庆州、怒江州、德宏州) 人口密度最低, 低于云南省平均人口密度, 且空间分布不平衡, 多沿江、湖和断陷盆地聚居。少数民族以白族、纳西族、藏族为主, 交错分布, 大杂居、小聚居。滇西北隶属青藏高原至云贵高原的过渡地带, 北接青藏高原, 东南与云贵高原相连, 地貌由东南向西北呈阶梯状逐级变化, 整体处于高山峡谷中。区内气候垂直分布显著。

滇南—滇西南地区 (临沧市、普洱市、西双版纳州、楚雄州、昆明市、曲靖市、玉溪市、红河州、文山州) 人口密度较大, 与云南省平均人口密度接近, 人口多沿高原台地 (坝子)、断陷湖盆、河谷三角洲、冲积扇地区聚居, 少数民族以彝族、哈尼族、傣族为主。滇南—滇西南地处云南高原南部, 位于元江以东、红河大裂谷以北、地形第二级阶梯向第三级阶梯过渡地带, 地势平坦, 坡度较小, 属于过渡型的亚热带季风气候。

由于自然环境、社会环境和民族文化差异,

滇东北、滇西—滇西北和滇南—滇西南农居结构形式和建筑风格均表现出明显的民族和地方特色。农居通常由当地建筑工匠根据房主的经济状况和要求, 结合当地传统习惯, 因地制宜、就地取材建造, 区域内建筑结构与格调相对一致。例如, 迪庆州藏式民居、丽江市纳西民居、大理州白族民居、德宏—保山傣族民居、楚雄彝族民居、玉溪“一颗印”民居。近年, 随着经济社会发展, 技术与文化逐渐趋同, 建筑地域性在新建农居 (尤其是砖混结构、框架结构) 中逐渐削弱。

### 1.2 云南农居结构划分

根据《地震现场工作 第 4 部分: 灾害直接损失评估》(GB/T 18208.4—2011) 地震灾区房屋结构类型, 结合云南地震现场工作实际和灾害损失评估报告, 云南农居主要结构类型为土木结构、砖木结构、砖混结构和钢筋混凝土框架结构 (周光全等, 2007)。

#### (1) 土木结构

土木结构是云南农居的常见类型, 以两层为主, 人字形屋顶, 一层用于居住, 另一层用于储物, 楼板多为木板。土木结构多为老旧房屋, 在偏远山区仍有部分存量。

土木结构房屋有明显的地域差异, 滇东北地区以抬梁式结构为主 (和嘉吉等, 2015), 木梁直接搁于山墙, 由夯土墙或无砂浆石砌墙承重, 山墙比较高、自重大、强度低, 与木梁无拉接, 稳定性差, 容易震酥、震裂而倒塌。滇西—滇西北、滇南—滇西南地区以穿斗木屋架结构为主, 木屋架承重, 榫卯方式连接, 房屋整体性较好。迪庆州藏式土木房屋墙体底宽, 截面为梯形, 梁柱截面尺寸大、承载力大、抗震能力好。

土木结构房屋震害在Ⅵ度、Ⅶ度区内表现为屋顶梭掉瓦、墙体开裂, 抬梁式建筑有屋架坍塌; Ⅷ度区表现为内屋顶开天窗, 墙体开裂严重, 山墙局部倒塌或倒塌, 穿斗木屋架出现木架倾斜、脱榫、柱脚位移; Ⅸ度区内, 则表现为倒塌明显。

#### (2) 砖木结构

砖木结构房屋多为单层或两层木屋盖, 楼板为木板, 多为石砌基础, 人字形屋顶。该类结构房屋有地域差异, 滇东北地区以抬梁式结构为主 (和嘉吉等, 2015), 瓦片屋顶, 木梁直接搁于山墙, 由黏土砖、空心砖砌成的墙体承重, 纵横墙

交接处为砖磋咬合砌筑,地震时容易山墙外闪,木屋盖塌落。滇西北、滇南地区以穿斗木屋架承重,围护墙为砖墙,瓦面多为石棉瓦。

砖木结构房屋震害在Ⅵ度、Ⅶ度区内屋顶梭掉瓦,墙体不同程度开裂;Ⅷ度区内墙体开裂严重,少数局部倒塌或倒塌;Ⅸ度区内局部倒塌或倒塌明显。

### (3) 砖混结构

砖混结构是目前云南农居中数量较多的结构类型,层数1~5层,层高2.6~2.9 m。老旧砖混房屋多设砖柱、无圈梁构造柱,在城乡结合部、经济不发达的山区还有部分存量;新建砖混房屋为现浇钢筋混凝土楼盖、屋盖,砌块、水泥砂浆砌筑墙体,设有钢筋混凝土圈梁、构造柱,整体抗震能力较好,但存在平立面不规则、房屋开间大、窗洞数量及尺寸设计不合理等问题。

砖混结构房屋震害在Ⅵ度、Ⅶ度区内表现为墙体有不同程度裂缝;Ⅷ度区内墙体出现“X”型贯穿裂缝或位错,门头、窗间墙或窗角开裂明显,部分砖柱断裂;Ⅸ度区内承重墙体出现较严重的水平或“X”型贯通裂缝,房屋局部倒塌或倒塌。

### (4) 钢筋混凝土框架结构

框架结构由钢筋混凝土梁柱构成承重体系,墙体用预制的加气混凝土、膨胀珍珠岩和多孔砖等轻质板材砌筑,起围护和分隔作用。该结构平面布置灵活、自重较轻,结构的整体性较好。云南农居中此类结构数量较少。

框架结构房屋震害在Ⅵ度、Ⅶ度区内表现为填充墙裂缝、抹灰层脱落,墙梁结合部位见横向细微裂纹;Ⅷ度区内填充墙局部倒塌、承重构件产生裂缝;Ⅸ度区内填充墙出现水平或“X”型贯通裂缝,框架节点开裂、甚至断裂,房屋整体倾斜、局部倒塌。

## 2 分区破坏比

### 2.1 数据选取

本文选取1993—2017年云南省内有记录的70次破坏性地震。筛选地震事件时,对于主-余震型、震群型地震,舍弃后一次地震。

破坏比数据主要源于《云南地震灾害特征及经济损失评估技术研究》(周光全等,2011)、

《1992—2010云南地震灾害损失评估及研究》(云南省地震局,2012)和云南地震灾害损失评估报告。统计破坏比样本时,由于评估报告以评估子区计算破坏比,易损性矩阵以烈度区计算破坏比,因此,存在评估子区与烈度区转换问题。评估子区与烈度区一一对应时,评估子区的破坏比为对应烈度区的破坏比;一个评估子区对应两个烈度区时,舍弃该评估子区对应的破坏比(明小娜等,2018);涉及城市评估子区时,分别统计农村和城市破坏比,即一次地震同一烈度区存在2个样本。

根据上述数据选取方法,共统计得出57个地震事件。不同分区最大震级地震分别为:滇东北地区发生的2014年8月3日鲁甸6.5级地震,最高烈度Ⅸ度;滇西—滇西北地区发生的1996年2月3日丽江7.0级地震,最高烈度Ⅸ度;滇南—滇西南地区发生的1995年10月24日武定6.5级地震,最高烈度Ⅸ度。

### 2.2 分区破坏比统计

土木和砖木结构称为简易房屋,其破坏等级分为毁坏、破坏和基本完好(周光全,2007),各分区不同烈度、不同破坏等级的破坏比均值见表1。由表1可见,滇东北地区土木结构总样本数为10个,Ⅶ~Ⅸ度区样本数偏少;滇西—滇西北地区土木结构总样本数为23个;滇南—滇西南样本数为31个;各分区Ⅸ度区样本仅1个。滇东北地区砖木结构总样本数为10个,Ⅶ~Ⅸ度样本数偏少;滇西—滇西北地区砖木结构总样本数为24个;滇南—滇西南地区砖木结构总样本数为29个;各分区Ⅸ度区样本仅1个。

砖混结构和框架结构为非简易房屋,其破坏等级分为毁坏、严重破坏、中等破坏、轻微破坏和基本完好,各分区不同烈度、不同破坏等级的破坏比均值见表2。由表2可见,滇东北地区砖混结构总样本数10个,Ⅶ~Ⅸ度区样本数偏少;滇西—滇西北地区砖混结构总样本数26个;滇南—滇西南地区砖混结构总样本数30个;各分区Ⅸ度区样本仅1个。滇东北地区框架结构总样本数9个,Ⅶ~Ⅸ度内样本数偏少;滇西—滇西北地区框架结构总样本数23个;滇南—滇西南地区框架结构总样本数26个;滇东北、滇西—滇西北Ⅸ度内样本仅1个,滇南—滇西南无Ⅸ度样本。

表 1 云南地区不同分区土木、砖木结构破坏比均值 (%)

Tab. 1 Earthquake damage mean values of mud – wood structures and brick – wood structures in different zones of Yunnan Province

不同分区	烈度	土木结构				砖木结构			
		样本数	毁坏	破坏	基本完好	样本数	毁坏	破坏	基本完好
滇东北	VI	10	1.46	20.35	78.19	10	0.65	19.01	80.34
	VII	3	9.99	59.32	30.69	3	4.84	63.34	31.82
	VIII	2	55.87	39.05	5.08	2	42.64	43.52	13.84
	IX	1	97.93	2.07	0	1	90.74	9.26	0
滇西—滇西北	VI	23	1.13	24.07	74.8	24	0.89	20.84	78.27
	VII	9	7.52	49.63	42.85	7	6.42	44.02	49.56
	VIII	5	28.16	53.07	18.77	5	34.98	54.92	10.1
	IX	1	67.7	32.3	0	1	55	45	0
滇南—滇西南	VI	31	1.06	28.16	70.78	29	0.51	24.05	75.44
	VII	13	7.5	54	38.5	11	3.53	50.37	46.1
	VIII	7	36.77	57.3	5.93	6	22.61	68.15	9.24
	IX	1	50.5	49.5	0	1	51	49	0

表 2 云南地区不同分区砖混、框架结构破坏比均值 (%)

Tab. 2 Earthquake damage mean values of masonry structures and reinforced concrete structures in different zones of Yunnan Province

不同分区	烈度	砖混结构						框架结构					
		样本数	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好	样本数	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
滇东北	VI	10	0	0.69	2.19	16.09	81.03	9	0	0.41	0.94	13.38	85.27
	VII	3	0.54	7.91	8.8	37	45.75	2	0	0	0	34.22	65.78
	VIII	2	3.63	13.23	34.38	32.61	16.15	2	0	0	14.74	24.5	60.76
	IX	1	19.27	24.76	25.58	21.57	8.82	1	8.9	22.84	34.08	23.03	11.15
滇西— 滇西北	VI	26	0	0.13	1.74	19.65	78.48	23	0	0	0.94	14.46	84.6
	VII	7	0.48	1.12	9.36	30.94	58.10	7	0	0	3.9	25.74	70.36
	VIII	5	6.57	11.67	26.49	32.62	22.65	5	1.67	8.8	15.95	29.54	44.04
	IX	1	11	38.1	14.5	19.6	16.8	1	0	12	33	34	21
滇南— 滇西南	VI	30	0	0.34	2.01	18.41	79.24	26	0	0	0.38	12.21	87.41
	VII	10	0	2.98	13	33.09	50.93	8	0	1.87	9.19	32.85	56.09
	VIII	6	1.08	12.45	26.87	38.71	20.89	4	2.19	8.7	11.78	46.49	30.84
	IX	1	11	38.1	14.5	16.5	19.9	—	—	—	—	—	—

3 云南地区分区农居易损性矩阵

3.1 算例分析

经验震害矩阵完善方法中假设待求震害矩阵与标准震害矩阵相邻烈度间震害指数的期望值和方差的变化值相同，同时认为各烈度的震害指数服从 Beta 分布，这样由其它烈度下震害指数的期望值和方差可以得到 Beta 分布的形状参数  $\alpha$  和  $\beta$ ，从而计算出对应于该烈度下震害指数的 Beta 概率密度分布函数，并由此计算待求震害矩阵未知烈

度各破坏等级的概率值（胡少卿等，2007）。

笔者运用经验震害矩阵完善的方法（胡少卿等，2007），以样本数大于 2 个的破坏比均值为基础数据，结合南北地震带房屋建筑抗震能力分区研究成果（孙柏涛等，2014），完善各结构类型震害例稀缺烈度的震害分布，建立云南地区不同分区的农居易损性矩阵。考虑云南与四川砖混结构房屋建筑特点较为相似，以南北地震带抗震能力分区（孙柏涛等，2014）一般设防砖混结构作为标准震害矩阵，类推计算该砖混结构 IX 度的破坏概率（表 3）。

结合标准震害矩阵及滇西—滇西北地区砖混结构Ⅵ~Ⅷ度破坏比,计算该地区砖混Ⅸ度的期望值和方差(图1),Beta分布函数的形状参数 $\alpha=0.928$ 、 $\beta=0.647$ ,由公式

$$f_{\xi}(x_{\alpha,\beta})=\frac{1}{B_{\alpha,\beta}}x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}$$
$$P(x_i\leq x\leq x_{i+1}|I)=\int_{x_{i+1}}^xf(x|I)dx$$

可计算出对应于该烈度下各破坏等级的概率值分别为26.99%、29.78%、20.11%、15.12%、8%。

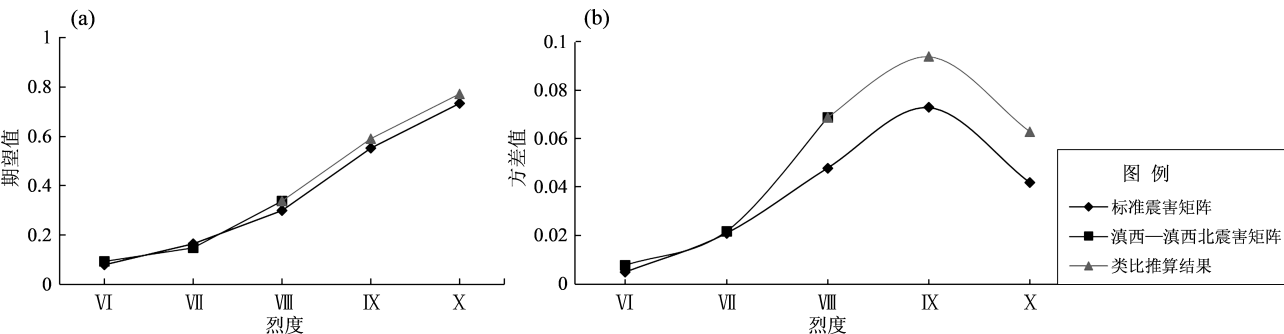


图1 滇西—滇西北砖混结构各烈度期望值(a)及方差(b)(%)

Fig.1 Expectation (a) and variance (b) of each intensity of masonry structures in the northeast of Yunnan Province (%)

3.2 不同分区易损性矩阵

按照上述算例计算方法,结合原破坏比均值(表1、2),补全不同分区、不同结构类型的易损性矩阵(表4、5)。土木和砖木结构易损性矩阵中,滇东北、滇西—滇西北地区Ⅵ、Ⅶ度破坏比为原统计值,Ⅷ~Ⅹ度为推算结果;滇南—滇西南地区Ⅵ~Ⅷ度为原统计值,Ⅸ、Ⅹ度为推算结果(表4)。砖混结构易损性矩阵中,滇东北地区Ⅵ、Ⅶ度破坏比为原统计值,Ⅷ~Ⅹ度为推算结果;滇西—滇西北、滇南—滇西南地区Ⅵ~Ⅷ度为原统计值,Ⅸ、Ⅹ度为推算结果(表5)。框架结构易损性矩阵中,滇东北地区Ⅵ度破坏比为原统计值,Ⅶ~Ⅹ度为推算结果;滇西—滇西北、滇南—滇西南地区Ⅵ~Ⅷ度为原统计值,Ⅸ、Ⅹ度为推算结果(表5)。

4 易损性分析

4.1 各类建筑破坏概率分析

基于易损性矩阵(表4)分析同一破坏等级

表3 滇西—滇西北砖混结构标准震害矩阵(%)

Tab.3 Standard earthquake damage matrix of masonry structures in the northeast of Yunnan Province (%)

烈度	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
Ⅵ	0	0	1	14	85
Ⅶ	0	1	13	36	50
Ⅷ	2	9	30	37	22
Ⅸ	13	42	24	13	8
Ⅹ	35	50	11	3	1

表4 云南地区不同分区土木、砖木结构易损性矩阵

Tab.4 Earthquake fragility matrixes of mud-wood structures and brick-wood structures in different zones of Yunnan Province

不同分区	烈度	土木结构			砖木结构		
		毁坏	破坏	基本完好	毁坏	破坏	基本完好
滇东北	Ⅵ	1.46	20.35	78.19	0.65	19.01	80.34
	Ⅶ	9.99	59.32	30.69	4.84	63.34	31.82
	Ⅷ	<u>54.23</u>	<u>40.33</u>	<u>5.44</u>	<u>43.09</u>	<u>44.65</u>	<u>12.26</u>
	Ⅸ	<u>77.96</u>	<u>22.04</u>	0	<u>71.41</u>	<u>28.59</u>	<u>0</u>
	Ⅹ	<u>100</u>	0	0	<u>82.23</u>	<u>17.77</u>	<u>0</u>
滇西—滇西北	Ⅵ	1.13	24.07	74.8	0.89	20.84	78.27
	Ⅶ	7.52	49.63	42.85	6.42	44.02	49.56
	Ⅷ	<u>31.92</u>	<u>54.76</u>	<u>13.32</u>	<u>28.58</u>	<u>56.48</u>	<u>14.94</u>
	Ⅸ	<u>64.3</u>	<u>35.7</u>	0	<u>61.5</u>	<u>38.5</u>	0
	Ⅹ	<u>70.86</u>	<u>29.14</u>	0	<u>68.47</u>	<u>31.53</u>	0
滇南—滇西南	Ⅵ	1.06	28.16	70.78	0.51	24.05	75.44
	Ⅶ	7.5	54	38.5	3.53	50.37	46.1
	Ⅷ	36.77	57.3	5.93	22.61	68.15	9.24
	Ⅸ	<u>70.6</u>	<u>29.4</u>	0	<u>62.39</u>	<u>37.61</u>	0
	Ⅹ	<u>76.18</u>	<u>23.82</u>	0	<u>70.48</u>	<u>29.52</u>	0

注:下划线数字为本文推算结果。

表5 云南地区不同分区砖混、框架结构易损性矩阵

Tab. 5 Earthquake fragility matrixes of masonry structures and reinforced concrete structures in different zones of Yunnan Province

不同分区	烈度	砖混结构					框架结构				
		毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好	毁坏	严重破坏	中等破坏	轻微破坏	基本完好
滇东北	Ⅵ	0	0.69	2.19	16.09	81.03	0	0.41	0.94	13.38	85.27
	Ⅶ	0.54	7.91	8.8	37	45.75	<u>0</u>	<u>0.54</u>	<u>7.23</u>	<u>32.27</u>	<u>59.96</u>
	Ⅷ	<u>2.54</u>	<u>19.62</u>	<u>30.02</u>	<u>31.37</u>	<u>16.45</u>	<u>0</u>	<u>3.05</u>	<u>17.41</u>	<u>41</u>	<u>38.54</u>
	Ⅸ	<u>25.69</u>	<u>33.41</u>	<u>21.75</u>	<u>14.04</u>	<u>5.11</u>	<u>5.37</u>	<u>22.86</u>	<u>27.5</u>	<u>27.45</u>	<u>16.82</u>
	X	<u>49.94</u>	<u>32.69</u>	<u>12.42</u>	<u>4.36</u>	<u>0.59</u>	<u>33.05</u>	<u>42.79</u>	<u>18.19</u>	<u>5.49</u>	<u>0.48</u>
滇西— 滇西北	Ⅵ	0	0.13	1.74	19.65	78.48	0	0	0.94	14.46	84.6
	Ⅶ	0.48	1.12	9.36	30.94	58.1	0	0	3.9	25.74	70.36
	Ⅷ	6.57	11.67	26.49	32.62	22.65	1.67	8.8	15.95	29.54	44.04
	Ⅸ	<u>26.99</u>	<u>29.78</u>	<u>20.11</u>	<u>15.12</u>	<u>8</u>	<u>10.37</u>	<u>21.96</u>	<u>21.73</u>	<u>23.3</u>	<u>227.64</u>
	X	<u>48.77</u>	<u>29.76</u>	<u>13.38</u>	<u>6.48</u>	<u>1.61</u>	<u>42.65</u>	<u>26.56</u>	<u>14.82</u>	<u>10.4</u>	<u>5.57</u>
滇南— 滇西南	Ⅵ	0	0.34	2.01	18.41	79.24	0	0	0.38	12.21	87.41
	Ⅶ	0	2.98	13	33.09	50.93	0	1.87	9.19	32.85	56.09
	Ⅷ	1.08	12.45	26.87	38.71	20.89	2.19	8.7	11.78	46.49	30.84
	Ⅸ	<u>17.85</u>	<u>34.82</u>	<u>25.61</u>	<u>16.46</u>	<u>5.26</u>	<u>10.3</u>	<u>23.14</u>	<u>22.84</u>	<u>23.52</u>	<u>20.2</u>
	X	<u>37.68</u>	<u>42.92</u>	<u>15.44</u>	<u>3.73</u>	<u>0.23</u>	<u>44.18</u>	<u>26.44</u>	<u>14.41</u>	<u>9.88</u>	<u>5.09</u>

注：下划线数字为本文推算结果。

土木、砖木结构在不同烈度区的破坏比。破坏等级为基本完好状态的概率曲线随烈度的增加而急速下降，Ⅷ度后趋于平缓，Ⅵ度破坏比值为0.75~0.8，Ⅸ度为0，表明大多数建筑在Ⅵ度时为基本完好（图2a）。破坏等级为破坏状态的破坏概率曲线随烈度的增大先增加到峰值后减小，滇东北土木、砖木结构破坏比在Ⅶ度处于峰值，Ⅶ、X度呈陡坡式下降，且土木结构在X度为0，滇西—滇西北、滇南—滇西南地区土木、砖木结构的破坏比在Ⅷ度处于峰值，Ⅸ、X度平缓，表明简易房屋在Ⅶ、Ⅷ度破坏明显，滇东北地区土木、砖木结构抗震能力均最差（图2b）。破坏等级为毁坏状态的概率曲线随烈度增加而增大，在Ⅵ度破坏比为0.5~1，Ⅶ、Ⅸ度急速上升，Ⅸ、X度趋于平缓，破坏比为0.6~0.8，表明简易房屋在Ⅸ、X度时大多数毁坏，滇东北地区土木结构在X度破坏比为1，全部毁坏（图2c）。

基于易损性矩阵分析同一破坏等级砖混、框架结构在不同烈度区的破坏比（表5）。破坏等级为基本完好状态的概率曲线随烈度的增加而减小，Ⅵ度为0.8~0.9，Ⅷ度后趋于平缓，表明大多数建筑物在Ⅵ度区为基本完好（图2d）。破坏等级为

轻微破坏状态的概率曲线随烈度的增加先增大后减小，滇东北地区砖混结构在Ⅶ度达最大值，滇西—滇西北、滇南—滇西南地区砖混、框架结构在Ⅷ度达最大值（图2e）。破坏等级为中等破坏的概率曲线随烈度增加呈先增大后减小的趋势，各分区砖混结构在Ⅷ度达最大值，框架结构在Ⅸ度达最大值，滇南—滇西南地区框架结构在Ⅵ、Ⅷ度增长趋势稍缓（图2f）。破坏等级为严重破坏的概率曲线，滇东北、滇西—滇西北地区砖混和框架结构、滇南—滇西南地区框架结构随烈度的增加而增大，在Ⅸ度后趋于平缓，滇南—滇西南地区砖混结构、滇东北地区框架结构随烈度的增加而增大，在Ⅷ度后迅速增长（图2g）。毁坏的破坏概率随烈度的增加而增大，各分区砖混结构在Ⅷ度、框架结构在Ⅸ度后增幅明显提高，滇南—滇西南地区砖混结构、各分区框架结构在Ⅷ度前毁坏概率基本为0，在X度毁坏概率值为0.4~0.5（图2h），表明砖混和框架结构具有良好的抗震能力。

#### 4.2 易损性指数分析

房屋建筑在各种地震强度作用下破坏概率的综合值称为易损性指数，易损性指数越小、其建筑抗震能力越强，易损性指数越大、则抗震能力

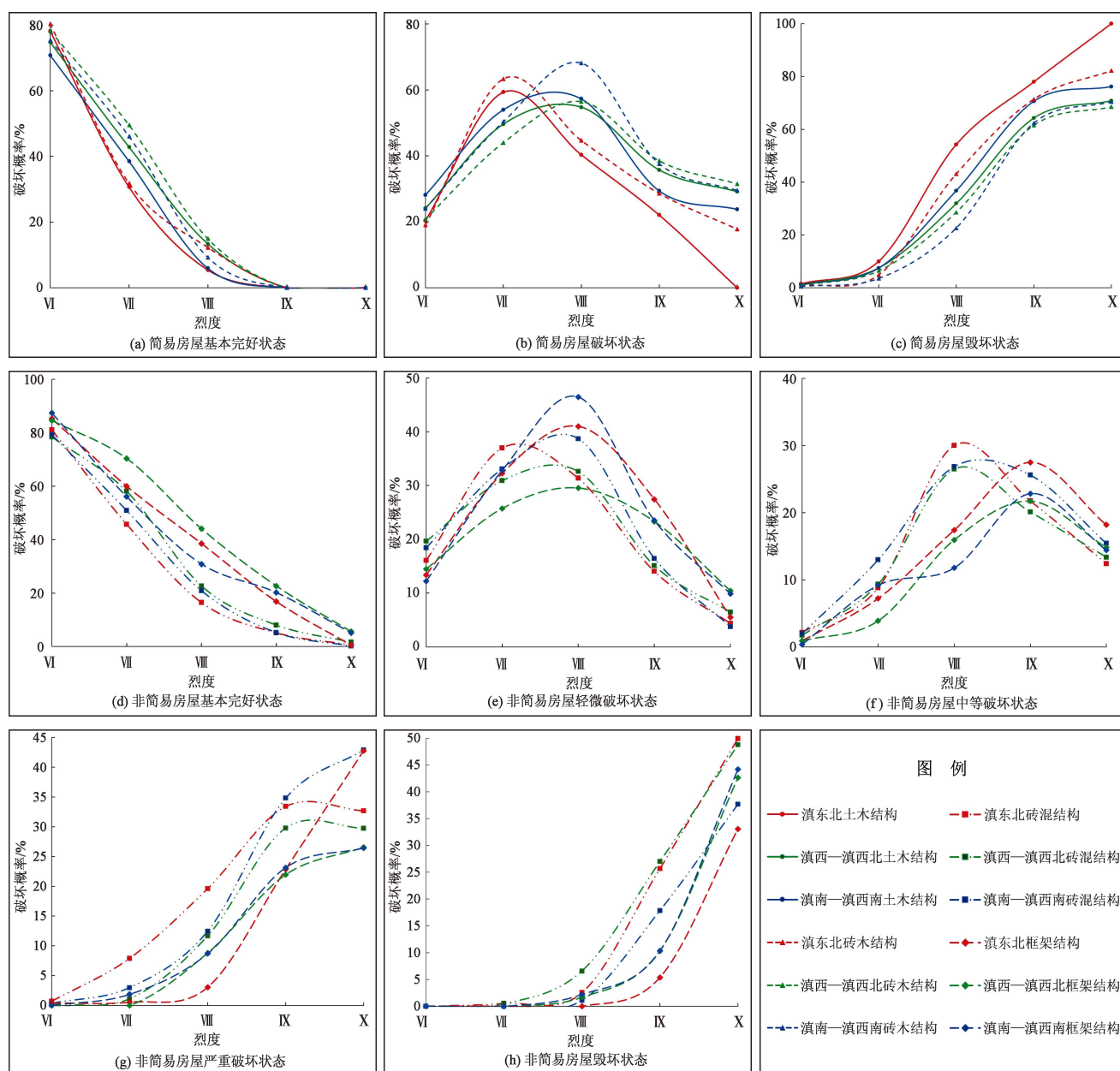


图2 各类建筑破坏概率

Fig. 2 the failure probability of different rural buildings

越差，它等于该结构不同烈度平均震害指数的算术平均值，计算方法如下：

$$VI = \frac{1}{5} \sum_{j=6}^{10} \sum_{i=1}^n d_i \lambda_i \quad (1)$$

式中： $d_i$ 为房屋破坏等级为 $i$ 的震害指数值，简易房屋基本完好、破坏和毁坏对应的 $d_i$ 取值分别为0，0.29，0.65（周光全，2011a），X度及以上毁坏对应的值为1，由于房屋在该烈度下震害极剧加重，多数承重构件严重破坏，濒于崩溃或已倒毁。非简易房屋

基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏对应的 $d_i$ 分别为0、0.2、0.4、0.7、1（中国地震局，1998）； $\lambda_i$ 为破坏等级为 $i$ 的房屋破坏比； $n$ 为破坏等级分类数，简易房屋 $n=3$ ，非简易房屋 $n=5$ 。

各分区不同结构的易损性指数见表6，土木结构的值为0.4~0.52，砖木结构的值为0.38~0.47，砖混结构的值为0.36~0.39，框架结构的值为0.28~0.29，由此得出：框架结构抗震能力最优，其次为砖混结构，砖木结构抗震能力略优于土木结构。

表 6 云南地区不同分区不同结构的易损性指数  
Tab. 6 the vulnerability indexs in different zones  
of Yunnan Province

不同分区	土木结构	砖木结构	砖混结构	框架结构
滇东北	0.52	0.47	0.39	0.28
滇西—滇西北	0.4	0.38	0.37	0.28
滇南—滇西南	0.42	0.38	0.36	0.29

滇东北地区土木结构易损性指数（0.52）最大，与其它两分区差值分别为 0.1、0.12，表明滇东北地区土木结构抗震能力最差，其次为滇南—滇西南；滇东北地区砖木结构易损性指数（0.47）最大，与其它两分区差值分别为 0.11，表明滇东北地区砖木结构抗震能力最差，滇西—滇西北、滇南—滇西南砖木结构抗震能力相当；滇东北地区砖混结构易损性指数（0.39）最大，与其它两分区差值分别为 0.03、0.02，表明云南各分区砖混结构抗震能力差异较小；滇西—滇西北地区框架结构易损性指数（0.29）最大，与其它两分区差值分别为 0.01，表明云南各分区框架结构抗震能力差异较小。由此得出，简易房屋抗震能力具有较大的区域差异，而非简易房屋抗震能力区域差异不明显。

5 结论

本文分析了滇东北、滇西—滇西北以及滇南—滇西南的地域特征以及因自然因素、社会因素和民族文化差异导致的建筑结构差异及其震害表现。根据 1993—2017 年 57 次破坏性地震的震害资料，运用数理统计方法统计各分区不同结构类型的房屋破坏比。同时，基于经验震害矩阵完善的方法补全震例稀缺烈度的破坏比，得到了云南省不同分区、不同结构的房屋建筑震害矩阵。通过各类建筑破坏概率和易损性指数计算，分析了不同结构的抗震能力以及同类结构不同区域的抗震能力，得出简易房屋抗震能力具有较大的区域差异，非简易房屋抗震能力区域差异不明显。修正后的基于历史地震的云南分区农居易损性矩阵，可用于云南农居群体震害预测以及地震灾害损失预评估，以期更好地服务于抗震救灾决策。

参考文献：

何志明,陈清军. 2018. 考虑竖向地震作用效应的地下典型空间结构易损性性能指标探讨[J]. 力学季刊,39(1):117-125.

和嘉吉,卢永坤,代博洋,等. 2015. 鲁甸  $M_s6.5$  与景谷  $M_s6.6$  地震灾区房屋抗震能力差异分析[J]. 地震研究,38(1):137-141.

胡少卿,孙柏涛,王东明,等. 2007. 经验震害矩阵的完善方法研究[J]. 地震工程与工程振动,27(6):46-50.

皇甫岗,秦嘉政,李忠华,等. 2007. 云南地震类型分区特征研究[J]. 地震学报,29(2):142-150.

贾哈曦,林均岐,刘金龙. 2019. 建筑结构地震易损性分析研究综述[J]. 震灾防御技术,14(1):42-50.

李静,陈健云,温瑞智. 2012. 框架结构群体震害易损性快速评估研究[J]. 振动与冲击,31(7):99-103.

林皓望,潘文,张健,等. 2019. 基于烈度差的云南省城市地区建筑易损性研究[J]. 建筑结构,49(8):33-36.

明小娜,周洋,卢永坤,等. 2018. 云南省砖混结构房屋震害矩阵修正研究[J]. 地震研究,41(4):605-613.

邱舒睿,高惠瑛. 2015. 青海省农居地震灾害易损性研究[J]. 震灾防御技术,10(4):969-978.

孙柏涛,陈洪富,闫培雷,等. 2014. 南北地震带房屋建筑抗震能力分区特征研究—以四川省为例[J]. 土木工程学报,47(增刊1):7-10.

孙柏涛,张博,闫培雷. 2018. 基于 IDA 方法的高层剪力墙结构地震易损性分析[J]. 山西建筑,44(18):27-29.

姚新强. 2016. 天津农居易损性与抗震能力分布研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.

于晓辉,吕大刚. 2016. 基于云图-条带法的概率地震需求分析与地震易损性分析[J]. 工程力学,33(6):68-76.

云南省地震局. 2012. 1992—2010 云南地震灾害损失评估及研究[M]. 昆明:云南科技出版社.

云南省统计局. 2019. 云南统计年鉴 2019[M]. 北京:中国统计出版社.

张桂欣,孙柏涛,陈相兆,等. 2018. 北京市建筑抗震能力分类及地震灾害风险分析[J]. 地震工程与工程振动,38(3):223-229.

中国地震局. 1998. 地震现场工作大纲和技术指南[M]. 北京:地震出版社.

周光全. 2011a. 云南地区简易房屋的震害指数研究[J]. 地震研究,34(4):88-95.

周光全,非明伦,毛燕,等. 2011b. 云南地震灾害特征及经济损失评估技术研究[M]. 昆明:云南科技出版社.

周光全,谭文红,施伟华,等. 2007. 云南地区房屋建筑的震害矩阵[J]. 中国地震,23(2):115-123.

Casciati F, Faravelli L. 1989. Seismic vulnerability via knowledge based expert systems [M]//Brescia CA: Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings. Southampton: Computational Mechanics Pub,299-307.

GB/T 18208.4—2011,地震现场工作第 4 部分:灾害直接损失评估[S].



## Study on the Fragility Matrix of Rural Buildings in Different Zones of Yunnan Province Based on Existing Earthquake

ZHOU Yang, MING Xiaona, YANG Jianqiang, LU Yongkun  
(*Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

The fragility matrix of buildings is an important calculation parameter for the initial evaluation and calculation of the direct economic loss of buildings after the earthquake. This paper analyzes the regional characteristics of Yunnan from the natural factors, social factors and ethnic customs, and Yunnan is divided three zones: Northeast, Northwest and Southwest. Based on the earthquake damage data in Yunnan Province from 1993 to 2017, used the experience analysis method and another method of making empirical earthquake damage matrix, fragility matrixes of each building structures of rural building in three regions are obtained. Based on the fragility matrix, calculated the probability of damage ratio curve and fragility index of each building structures, this paper analyzes the seismic capacity of different rural building structures and the seismic capacity of the same structure in different zones. The results show that: there are large regional differences between mud – wood structures and brick – wood structures, and the seismic capacity in Northeast Yunnan is the worst; the regional difference of seismic capacity of masonry structures and reinforced concrete structures is not obvious.

**Keywords:** Yunnan rural building; regional characteristics; damage ratio; fragility matrix