

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20210416004

## 山洪对汶川县村镇建筑的破坏特征及影响因素分析\*

甄亿位<sup>1,2,3</sup>, 刘曙光<sup>1,2,3</sup>, 钟桂辉<sup>1</sup>, 周正正<sup>1</sup>, 方琦<sup>1</sup>, 郑伟强<sup>1</sup>, 梁冀雨<sup>1</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 联合国环境署—同济大学环境与可持续发展学院, 上海 200092;  
3. 中国气象局上海城市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200092)

**摘要:** 受“5·12”汶川大地震对地表强烈扰动影响, 汶川县近年来山洪灾害频发, 对当地村镇房屋造成了严重破坏。汶川县2019年和2020年连续两年发生了“8·20”和“8·17”群发性特大山洪灾害, 以两场山洪灾害中部分受损村镇建筑为研究对象, 通过灾情数据挖掘和典型案例分析, 总结了不同结构类型建筑破坏特征、沿河建筑破坏程度空间差异性和建筑遮掩效应等破坏特点以及冲击、冲刷、淤埋、浸泡等破坏方式。根据调研分析, 结合山洪破坏特征, 对现有建筑破坏等级标准进行改进, 提出了山洪灾害下村镇建筑破坏分级标准。应用随机森林算法和统计分析方法, 从水深暴露性、选址暴露性、物理脆弱性等方面综合分析了建筑洪灾破坏的主要影响因素及其作用关系。最后基于建筑受灾破坏情况分析, 提出了提高山区村镇建筑防洪减灾能力的对策和建议。

**关键词:** 山洪灾害; 村镇建筑物; 破坏特征; 影响因素; 汶川县

**中图分类号:** TU12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2022)01-0001-11

## Characterization and Impact Factors of the Damage to Village Buildings by Mountain Torrent Disasters in Wenchuan County

ZHEN Yiwei<sup>1,2,3</sup>, LIU Shuguang<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Guihui<sup>1</sup>, ZHOU Zhengzheng<sup>1</sup>, FANG Qi<sup>1</sup>,  
ZHENG Weiqiang<sup>1</sup>, LIANG Jiyu<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. UN Environment-Tongji Institute of Environment for Sustainable Development, Shanghai 200092, China;

3. Key Laboratory of Cities Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, China Meteorological Administration (CMACC), Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Due to the strong surface disturbance caused by the "5.12" Wenchuan earthquake, mountain torrent disasters have occurred frequently in Wenchuan County in recent years, causing serious damage to local houses. In Wenchuan County, two mountain torrent disasters, "8.20" and "8.17", occurred in 2019 and 2020. Taking some of the damaged village buildings in the two disasters as research objects, this paper summarized the damage characteristics of different structural types of buildings, the spatial variability of the damage degree of buildings along the river and the building masking effect, as well as the damage modes of impact, scouring, siltation and immersion through disaster data mining and typical case analysis. Based on the research and analysis, this paper improved the existing building

\* 收稿日期: 2021-04-16; 修回日期: 2021-06-10

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1100401)资助

作者简介: 甄亿位(1990—), 男, 博士研究生。主要从事村镇防洪减灾研究。E-mail: zhenyiwei@tongji.edu.cn

通讯作者: 刘曙光(1962—), 男, 教授, 博士。主要从事港口与防洪工程研究。E-mail: liusgliu@tongji.edu.cn

damage grading criteria by combining the characteristics of mountain torrent damage, and then proposed the classification of mountain torrent damage to rural buildings. Applying random forest algorithm and statistical analysis methods, the main influencing factors of building flood damage and their relationships were comprehensively analyzed in terms of water depth exposure, site exposure, and physical vulnerability. Finally, based on the analysis of building damage, some suggestions were proposed to improve the flood mitigation capacity of buildings in mountainous villages. The research results lay the foundation for further research on the physical mechanism of building flood damage, and also provide references for flood prevention planning and disaster mitigation design of buildings in mountainous villages and towns.

**Keywords:** mountain torrent disasters; village buildings; damage characteristics; impact factors; Wenchuan County

## 引言

山洪灾害泛指山丘区短时强降雨引发的洪水及洪水诱发的泥石流、滑坡等自然灾害<sup>[1]</sup>。受2008年大地震影响,汶川县地表破碎严重,植被覆盖率大幅减少。研究表明,大地震后汶川地区山洪发生的临界雨量明显降低,山洪灾害频发,且常伴随泥石流和滑坡等地质灾害<sup>[2-3]</sup>。汶川地区震后山洪灾害的活动性和破坏性大大增强,灾害活跃期将维持20~30年<sup>[4]</sup>。2019年8月19~20日,汶川县遭遇持续强降雨,引发群发性特大山洪灾害,全县10个乡镇不同程度受灾,避险转移群众和游客4.8万人,房屋受损602户,直接经济损失达326 251.6万元。2020年8月16~18日,受极端强降水影响,汶川县再次发生群发性山洪灾害,导致全县境内7个乡镇不同程度受灾,避险转移4 213人,房屋损坏或倒塌580间,全县直接经济损失达29 509.85万元。连续两年的特大山洪灾害给汶川县造成了巨大的人员伤亡和财产损失,其中居民房屋受灾破坏是重要致因。

目前,山洪对村镇建筑破坏的研究还相对较少,以历史灾情资料分析<sup>[5]</sup>、力学计算<sup>[6]</sup>、物理模型试验<sup>[7]</sup>和数值仿真研究<sup>[8]</sup>等为主。其中力学计算、模型试验和数值仿真方法可较好反映建筑洪灾破坏的理论原理和物理机制,但这些方法应用中,常遇到实际场景较难还原,动力相似条件较难满足,计算参数难以测定等问题。因此,以灾后调查为基础的建筑受灾结果的定性研究和灾情数据统计的定量分析,可为力学计算、模型试验和数值仿真等进一步的建筑山洪破坏机理研究提供物理原型和

参考依据。

笔者所在课题组分别于2019年10月和2020年12月多次赴汶川县开展实地调研,通过现场调查、遥感解译、无人机测量等研究手段,收集获取了汶川县2019年“8·20”和2020年“8·17”山洪灾害重点灾区的部分受损建筑数据。通过调研与分析,总结了山洪灾害对村镇建筑的破坏特点和破坏方式,改进了现有建筑破坏等级划分的标准,并应用随机森林算法定量化衡量了各建筑特征指标对建筑受灾破坏的影响,在此基础上,提出一些提高山区村镇建筑防洪减灾能力的对策措施,为山区村镇建筑物的选址布局和防洪设计提供参考。

## 1 受灾建筑破坏特征分析

### 1.1 受灾建筑物概况

通过实地调研,收集获取了汶川县2019年“8·20”和2020年“8·17”两场山洪灾害中117栋受灾建筑的样本数据,涉及绵虬镇草坡片区、大禹村和羌锋村,三江镇草坪村和街村,水磨镇马家营村等重点受灾村镇(调研村镇点位见图1),其中绵虬镇草坡片区、大禹村和羌锋村在“8·20”和“8·17”洪灾中均受灾,三江镇草坪村和街村、水磨镇马家营村主要在“8·20”洪灾中受灾。

根据建筑承重体系结构类型,汶川县受灾建筑可分为土石木结构、砖木结构、砖混结构和框架结构等4类(表1)。据统计,调研的汶川受灾村镇中以砖混和框架结构房屋为主,其中砖混结构建筑50栋,框架结构建筑55栋(包括整体框架和底层框架),共占调查样本的90%,基本为汶川“5·12”地震后重建房屋。此外,调研样本的房屋功能用途主要

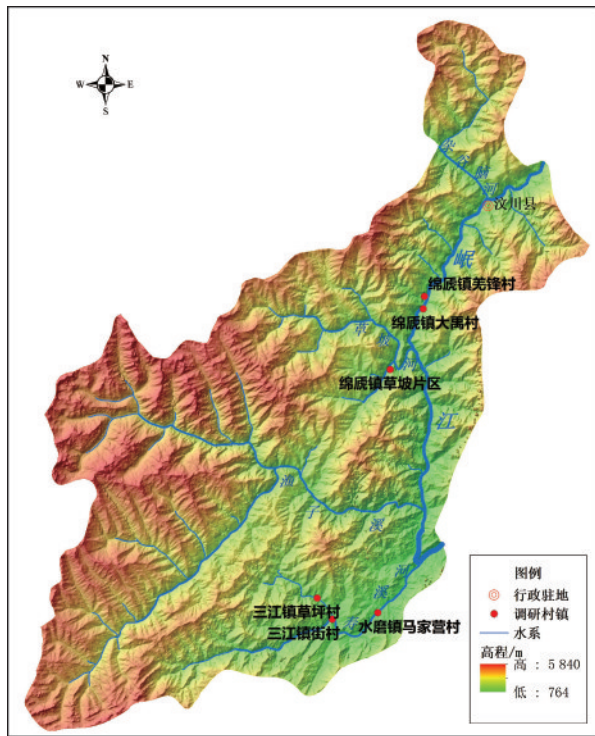


图1 汶川县受灾村镇调研点空间位置

Fig.1 Spatial location of research sites in the affected villages in Wenchuan County

为居民住宅,占调研样本的84%,其余用途包括经营性用房(如厂房、单位用房等)和公共服务用房(如农贸市场、学校、派出所等)。

表1 受灾建筑结构类型分布

Table 1 Distribution of structure types of affected buildings

灾害地点	土石木结构	砖木结构	砖混结构	框架结构
绵鹿镇草坡片区	0	20	43	38
绵鹿镇大禹村	13	0	13	75
绵鹿镇羌锋村	6	0	50	44
三江镇草坪村	0	0	8	0
三江镇街村	2	2	44	52
水磨镇马家营村	0	0	0	5
占比合计/%	3	8	43	47

## 1.2 受灾建筑破坏特点

### (1) 不同结构类型建筑的破坏特征

根据现场调查,不同结构类型建筑在洪水作用下的破坏特征差别较大,土石木和砖木结构以结构整体破坏为主,砖混和框架结构以局部构件破坏

为主。

#### 1) 土石木结构

该类房屋以土坯、石块或木材等天然材料作为承重和围护结构。受房屋材料强度影响,土石木结构建筑墙体整体性差,抗冲性不强,在洪水冲击等水平作用下极易发生墙体和梁柱成片倒塌等结构性破坏(图2(a)),进而造成房屋整体垮塌。另外在洪水浸泡作用下,土石木结构的房屋材料性能大幅下降,易发生墙体开裂甚至坍塌。

#### 2) 砖木结构

该类房屋用砖墙、砖柱、木屋架作为主要承重结构,以黏土砖为围护墙体。砖木结构房屋结构稳定性强于土石木结构,但木质梁柱与砖体间黏结性差,没有构造柱和拉接筋等构造措施,整体性仍较差,面对洪水冲击,易出现墙体和承重梁柱大面积破坏(图2(b)),严重的将引发房屋整体崩塌。

#### 3) 砖混结构

砖混结构指以砖墙为承重构件,楼面、屋面采用钢筋混凝土现浇板或预制板的房屋结构。受调研的砖混结构房屋大多设置了圈梁,房屋整体性较强,洪水冲击一般造成墙体局部磨损或轻微破坏,但洪水携带的沙石漂木可能会造成更为严重的墙体剪切破坏,同时洪水掏蚀沿河房屋地基,会造成房屋失稳倾斜或墙体变形开裂(图2(c))。

#### 4) 框架结构

汶川大地震后,汶川县新建村镇房屋采用整体框架或底部框架—上部砖混结构较多。框架结构由钢筋混凝土框架承重,砖砌墙作为填充墙,下部为钢筋混凝土基础,建筑整体性和稳定性好,其抗洪抗震性能比较优越,即使面临洪水冲击冲刷,仍能保持主体基本完整,建筑破坏一般以门窗破坏、墙面磨蚀和室内淤埋为主(图2(d)),但如遭受洪水及携带物的正面剧烈冲击,有可能会造成填充墙和支撑柱的破坏。

### (2) 沿河建筑破坏程度的空间差异性

山区河道曲折多弯,河道水流条件沿程变化较大,同一场洪水对沿河不同选址位置的建筑造成的破坏程度在空间上差异明显,调研发现,凹岸建筑破坏通常强于凸岸,急弯过渡段破坏最严重。

以2019年“8·20”洪灾中受灾较严重的汶川县三江镇街村为例,街村建筑基本为砖混和框架结构,穿村段河道呈现山区河道较为典型的正弦曲线连续弯道形态,且河道弯道曲率较大。根据现场调



图2 不同结构类型建筑实例破坏情况

Fig.2 Damage of building examples of different structural types

研,该段河道左岸房屋(图3中A区~D区)破坏等级整体高于右岸房屋(图3中E区),两个弯段连接过渡处左岸建筑受损最严重(图3中C区)。实地调查显示,建筑物C1和C2均遭受高速洪水及其携带物的正面冲击,建筑物C1底层前排三根砖混承重柱被冲断,前沿楼板变形,二楼承重墙体产生了数条较大裂缝(图4(a)),建筑物C2墙体开裂变形严重,部分钢混柱断裂,钢筋扯断并裸露在外(图4(b)),

可见该处洪水携带了巨大的动能,作用于建筑时产生的弯矩和剪力超过了建筑承重构件的极限弯矩和剪力,使承重墙和承重柱等关键构件发生了严重的剪切和弯曲破坏。

分析水流规律可知,该段河道弯道形态导致洪水期间河道主流偏向左侧凹岸,左侧凹岸洪水流速及动能远大于右侧凸岸,最大动能出现在两个弯道过渡段(凸岸弯顶处),水流动能的差异分布在两岸建筑破坏结果上得到了充分的体现和验证,此结论可与曹玉芬等、胡旭跃等的研究成果<sup>[9-10]</sup>相印证。

### (3) 建筑遮掩效应

洪水通过多排建筑时发生扰流,产生水流分离、涡旋和涡转等现象,在前排建筑背流区形成负压区,流速和水深均大大减小,后排建筑损坏较小,受前排迎流建筑遮挡,后排建筑未受洪水破坏或破坏较小,称之为建筑遮掩效应。如三江镇街村的B1、B2和B3建筑前后排布置(见图3),前排B1和B2建筑受淹2.8~3.0 m,一楼门窗均破坏,迎流面部分墙面瓷砖脱落(图4(c)),而建筑物B3受前排B1和B2建筑物遮掩,一楼受淹1.8 m,墙面和地面受洪水沉积物污染,但无明显



图3 三江镇街村建筑受灾情况

Fig.3 Building damage in Jiecun, Sanjiang Town

破坏痕迹(图4(d))。根据实地测量,B3建筑地基相对B1和B2建筑高约0.8 m,可见除B3建筑地基有所抬升原因外,B1和B2建筑的前排遮掩

效应,也一定程度上减小了B3建筑的受损程度。因此,建筑空间布局设计时应考虑多排建筑遮掩带来的防洪效应。



图4 建筑受损破坏情况  
Fig.4 Damage of buildings

(4) 附属屏障措施保护作用

实践证明,围墙或屋前树木植被等房屋附属屏障对建筑有较好防护作用,能有效抵挡洪水冲击,拦蓄洪水固体碎屑物和漂浮物,大幅减小建筑受损程度。如图3中建筑物A1与建筑物A2毗邻而建,面对洪水冲击,A1建筑物门窗基本完全破坏,墙面磨蚀严重,墙体有小裂缝(图4(e)),而A2建筑物建有全封闭式围墙,仅围墙外侧墙面磨蚀破损较严重,房屋除底层部分受淹,主体构件基本未受影响(图4(f)),围墙附属措施对主屋的保护作用凸显,

A2建筑安全性明显高于A1。

1.3 村镇建筑受灾破坏方式

根据调研资料分析,在不同洪水作用力下,洪水对建筑物主要造成激烈的动力破坏和缓变的侵蚀破坏<sup>[11]</sup>。根据不同的洪水作用力类型及建筑物破坏特征,洪水作用下村镇房屋建筑物的受灾破坏方式可归纳为冲击、冲刷、淤埋、浸泡4种破坏。实际中,4种破坏方式并非单独发生,往往相互耦合作用,共同造成建筑破坏。

### (1) 冲击破坏

冲击破坏是洪水对建筑最常见的破坏方式。当山洪的高速水流直接冲击房屋建筑时会造成急剧的动力破坏,建筑门窗、墙体和承重梁柱等构件遭受破坏(图5(a)),甚至导致建筑整体垮塌。房屋受冲击的损坏情况与洪水特征(水深、流速等)、建筑特性(结构材料、构件尺寸、所处位置、迎流角度等)以及建筑群布局等有关,另外洪水携带的泥沙块石和漂浮物的撞击作用也是造成冲击破坏的重要原因。

### (2) 冲刷破坏

洪水冲刷掏蚀建筑地基土,导致建筑基础滑移断裂,引发建筑倾斜或倒塌。山洪或河道洪水不断冲蚀河沟两岸的建筑地基,造成地基土短时间大量流失,建筑局部地基掏空,引起建筑不均匀沉降或滑移变形,房屋易发生失稳倾斜或构件破坏甚至整

体倒塌(图5(b))。

### (3) 淤埋破坏

当洪水的冲击能量小于建筑物抵抗形变能,建筑物主体结构基本不会破坏,但洪水携带泥沙和漂浮物通过门窗洞口进入建筑物内部并淤埋其中,会致使门窗破坏,底层空间被淤埋(图5(c)),沉积物会污染腐蚀墙体地面,堵塞门窗和输水管道,导致建筑物无法正常使用。

### (4) 浸泡破坏

当建筑受洪涝积水较长时间浸泡后,一方面,地基土吸水软化,抗剪强度下降,压缩性提高,将引发建筑地基不均匀沉降,导致房屋倾斜、墙体开裂等后果(图5(d));另一方面,建筑材料特别是木材、生土以及石灰等水敏性材料在长时间洪水浸泡下强度下降,黏结性能降低,致使建筑结构破坏甚至房屋墙体倒塌。



(a) 冲击破坏



(b) 冲刷破坏



(c) 淤埋破坏



(d) 浸泡破坏

图5 建筑物洪灾破坏方式

Fig.5 Damage pattern of buildings due to mountain torrent

## 1.4 建筑洪灾破坏等级划分

科学规范评估建筑物受山洪破坏情况,需依据一定的山洪对建筑破坏的损伤分类判定准则,但目

前国内尚缺乏相应标准。基于本次受灾建筑的调研情况,参考《建(构)筑物地震破坏等级划分标准》(GB/T 24335—2009)<sup>[12]</sup>、《农村住房安全性鉴定技术导则》(2019)以及《民用建筑可靠性鉴定标准》

(GB 50292—2015)<sup>[13]</sup>等规范,结合 M.Jakob<sup>[14]</sup>、H. Maiwald<sup>[15]</sup>以及曾超等<sup>[16]</sup>、胡凯衡<sup>[17]</sup>等的研究成果,改进现有建筑破坏等级划分标准,根据承重构件和非承重构件受损程度和建筑修复难易程度,结合山洪破坏特征,以半量化方式给出山洪灾害下建筑破坏等级划分标准,将建筑受损程度分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、倒塌破坏等5级,具体等级描述及各等级样本占比见表2。

本文提出的建筑山洪破坏等级划分标准主要关注建筑结构系统损伤程度和灾后修复成本及修复可能性,建筑破坏等级的确定以承重构件(承重

梁柱/墙体)的破坏程度为主,兼顾非承重墙、门窗、墙面涂层、建筑基础等重要组成部分的受损程度,并综合考虑建筑修复的难易程度。受本次调研样本影响,该建筑破坏等级划分标准主要适用于汶川县常见的砖混结构和框架结构建筑,其他结构类型建筑可参考使用。

据统计,汶川2019年“8·20”和2020年“8·17”两场山洪灾害的受灾建筑调研样本中破坏等级为轻微破坏级别的房屋最多,占比达到48%,中等破坏和基本完好的房屋分别占22%和21%,大多为震后重建房屋,表明汶川县震后重建房屋具有较好的防灾性能。

表2 建筑山洪灾害破坏等级划分标准

Table 2 Classification of mountain torrent damage to building

破坏等级	破坏特征描述	破坏尺度	调研样本占比/%
基本完好	承重梁柱/承重墙体完好;10%以内的门窗受损,墙面污染	无结构性损坏,无需修理或稍加修理	21
轻微破坏	承重梁柱/承重墙体基本无破坏或有轻微开裂;个别非承重墙有明显裂缝或破坏;10%~50%的门窗破坏,墙面轻微剥蚀	无结构性损坏,需简单修理	48
中等破坏	部分承重梁柱/承重墙体出现明显裂缝或变形;部分非承重墙明显破坏或局部倒塌;超过50%门窗破坏,墙面严重剥蚀;外露基础受侵蚀损坏,部分墙体出现明显沉降	部分结构性损坏,需一般修理	22
严重破坏	多数承重梁柱/承重墙体严重开裂或变形,部分墙体严重破坏或倒塌;非承重墙成片倒塌;基础局部塌陷,房屋整体明显沉降或倾斜	主体结构性损坏,需大修或局部拆除	5
倒塌破坏	承重梁柱/承重墙体毁坏坍塌超过50%;基础大半侵蚀塌陷,房屋整体严重倾斜	功能丧失,需拆除重建	3

## 2 建筑破坏影响因素分析

基于洪灾系统理论,从承灾体的暴露性和脆弱性两方面,对山洪对建筑物破坏的影响因素展开分析。通过调查结果和相关资料分析,选定水深暴露性(建筑受淹深度)、选址暴露性(建筑与河岸距离、建筑基础与河岸相对高程)和物理脆弱性(建筑结构类型、建筑功能用途、建筑平面面积)3类6个指标因子(表3),综合分析建筑受灾破坏的主要影响因素及其对破坏结果的作用关系。

### 2.1 建筑破坏影响因子贡献度分析

研究表明,传统的相关系数分析方法只能反映两个变量的单调关系,而随机森林算法能够评估非单调的多变量关系<sup>[18]</sup>。相对于传统的相关分析,随

机森林算法更能反映非线性复杂的建筑洪灾破坏成因关系。因此,本文利用随机森林算法的因子重要性度量功能,分析各指标因子对建筑受灾程度的贡献度,进而得到各指标对建筑受灾破坏结果的影响程度。

#### (1) 方法原理介绍

随机森林因子重要性度量方法的原理:在生成每个子训练集过程中,利用自助法抽样(Bootstrap Sampling)抽取原训练集约67%的样本,其余样本组成袋外数据(Out-Of-Bag, OOB),作为测试样本。随机改变某变量取值(即增加噪声),利用生成的随机森林模型进行OOB误差计算,OOB误差增加越多,该变量越重要,即对建筑破坏结果贡献度越大<sup>[19]</sup>。随机森林模型需要设置的参数主要包括决策树数量 $n_{tree}$ 和决策树节点分割时随机选取的候选变量数 $m_{try}$ ,本文利用自举法,计算不同参数设置下

表3 建筑破坏影响因素

Table 3 Factors influencing the damage to building

准则层	要素层	指标因子层	数据来源	单位/值形式
暴露性	水深暴露性	建筑受淹深度 $H_1$	实地调查	m
	选址暴露性	建筑与河道距离 $D_R$	无人机/遥感影像解译	m
		建筑基础相对高程 $E_R$	无人机/遥感影像解译	m
脆弱性	物理脆弱性	建筑结构类型 $S_T$	实地调查	土石木(1)、砖木(2)、砖混(3)、框架(4)、 钢结构(5)、其他(6)
		建筑功能用途 $F_U$	实地调查	居民住宅(1)、经营性用房(2)、公共服务用房(3)
		建筑平面面积 $A_R$	无人机/遥感影像解译/ 实地调查	$m^2$

的随机森林模型 OOB 误差,进而得到最优参数<sup>[20]</sup>。

影响因素重要度计算方法是通过对随机森林模型中的每一个决策树计算其 OOB 误差( $E_{OOB1}$ ),随机对所有样本的某一指标数值加入噪声干扰,再次计算 OOB 误差( $E_{OOB2}$ ),对所有决策树的  $E_{OOB1}$  和  $E_{OOB2}$  的差值取平均值,得到模型结果准确率降低均值 (Mean decrease accuracy,  $MDC$ )。对各指标要素的  $MDC$  值进行归一化,即可得到指标要素重要度  $P_i$ ,即可按下式计算:

$$MDC_i = \frac{\sum_{k=1}^N (E_{OOB2_{ik}} - E_{OOB1_{ik}})}{N} \quad (1)$$

$$P_i = \frac{MDC_i}{\sum_{i=1}^n MDC_i} \times 100\% \quad (2)$$

式中,  $MDC_i$  为第  $i$  项指标的模型准确率降低均值;  $P_i$  为第  $i$  项指标的重要程度;  $E_{OOB2_{ik}}$  为加入噪声后第  $i$  项指标在第  $k$  棵决策树对应的袋外误差,  $E_{OOB1_{ik}}$  为加入噪声前第  $i$  项指标在第  $k$  棵决策树对应的袋外误差;  $N$  为决策树数量;  $n$  为指标个数。

### (2) 结果分析

基于调研样本数据,应用随机森林分类算法,将 6 个指标因子量化数值作为模型输入,建筑破坏等级为模型输出,构建随机森林模型计算各指标因子重要度。通过自举法试算,得到 OOB 误差最小时的模型最优参数  $m_{try}=2, n_{tree}=900$ 。采用最优参数,进行随机森林模型训练,计算得到  $MDC$  值,并进一步归一化处理得到各指标因子的重要度  $P_i$ ,各指标因子重要度排序结果如图 6 所示。

由图 6 可知,各指标因子对建筑破坏等级影响由大到小依次为建筑受淹深度、建筑与河距离、建筑结构类型、相对高程、建筑功能、建筑面积,其中前 4 项指标重要度均超 10%,累计超过

总数的 80%,可以认为这 4 项指标对建筑破坏结果起主导作用,是建筑受洪水破坏的主要影响因素。

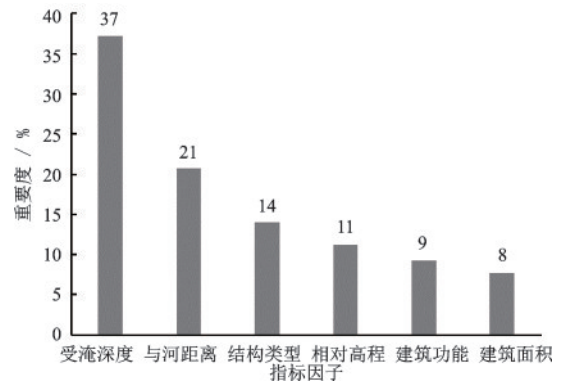


图6 因子重要性分析

Fig.6 Factor importance analysis

### 2.2 水深暴露性要素影响分析

水深暴露性体现了建筑受洪水影响的程度,以建筑受淹深度表示。当洪水受建筑物阻挡会产生一定壅高,壅高的洪水将其携带的动能充分转化为对建筑物的破坏能<sup>[11]</sup>,本文采取的建筑受淹深度通过量测建筑迎流面墙上的洪痕高度得到,该洪痕高度包括了洪水壅高,因此可以认为该建筑受淹深度包含了部分洪水动能影响。

以砖混结构和框架结构房屋为例,根据淹没深度与建筑受灾破坏程度的关系(图 7),本次调研的受灾建筑淹没深度主要在 1~5 m,受洪水场分布和建筑具体特性等其他因素影响,某特定水深下建筑可能呈现多种破坏级别结果。在 1~2 m 淹没深度下,调研样本中房屋主要表现为基本完好和轻微破坏;2~3 m 淹没深度下,主要表现为轻微破坏和中等破坏;3 m 以上淹没深度则主要为严重破坏。总

体而言,建筑的受灾破坏级别呈现随淹没深度增大而增加的趋势。结合因子重要度评价,表明水深暴露性是影响建筑破坏程度的关键要素,可通过设置围墙和防护林木等附属防护措施以及加强河道堤防建设等,来减小建筑受淹深度,降低建筑破坏程度。

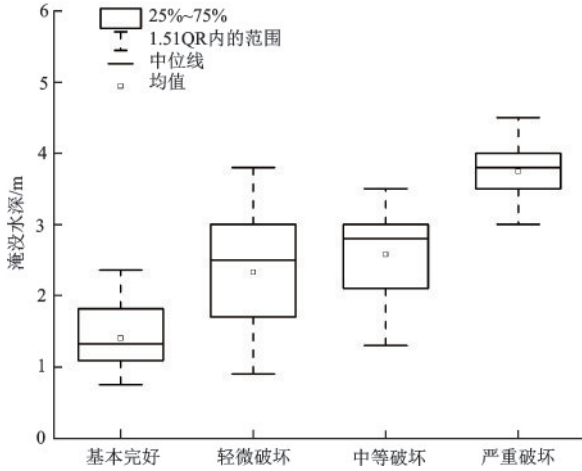


图7 淹没深度与建筑受灾破坏等级的关系

Fig.7 Relationship between the inundation depth and the building damage level

### 2.3 选址暴露性要素影响分析

建筑选址暴露性指建筑在洪水淹没范围内的位置分布,主要考虑的是建筑与河道的空间关系,包括与河岸相对距离以及相对高程(建筑基础与河岸高程差)两个空间衡量指标。以砖混结构和框架结构房屋为例,基于调研样本的建筑破坏分布情况(图8),建筑破坏程度与建筑和河道距离以及相对高程总体上呈负相关关系,即建筑距河道越近,建筑基础越低,洪水对建筑破坏越强,导致建筑破坏程度和比例越大。对于严重破坏和中等破坏的建筑,该破坏规律表现地尤为明显。

经进一步分析可知,洪水对建筑破坏在空间上具有较为明显的强度分区性(表4),具体表现为河岸外0~20 m范围且相对高程小于1.1 m的房屋以严重破坏和中等破坏为主,属于强破坏区;距河岸20~45 m范围内且相对高程在1.1~1.8 m间的房屋以中等破坏和轻微破坏为主,属于较强破坏区;其余范围以轻微破坏和基本完好等为主,属于弱破坏区,村镇规划和防灾设计中应特别关注强破坏区建筑的防洪安全。

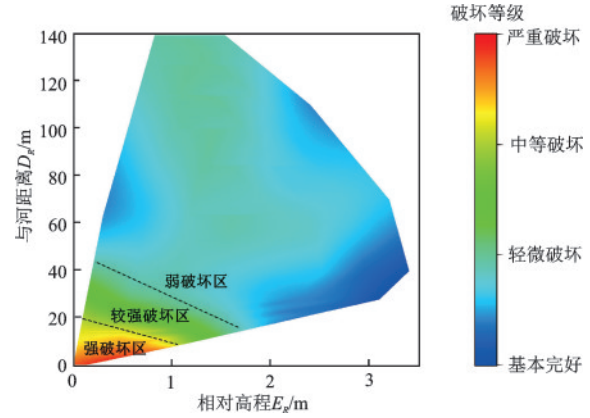


图8 建筑破坏分布热力图

Fig.8 Heatmap of building damage distribution

表4 建筑洪灾破坏强度分区(以砖混结构和框架结构为例)

Table 4 Zoning of building flood damage intensity (brick and frame structure as an example)

破坏强度分区	建筑选址范围	可能破坏级别
强破坏区	$0 \leq D_r \leq 20, E_r \leq 1.1$	中等及中等以上破坏
较强破坏区	$20 < D_r \leq 45, 1.1 < E_r \leq 1.8$	轻微破坏~中等破坏
弱破坏区	$D_r > 45, E_r > 1.8$	轻微及轻微以下破坏

### 2.4 物理脆弱性要素影响分析

物理脆弱性是指建筑自身面对灾害的抵御能力,本文选定结构类型、功能用途和建筑面积3个具体指标来描述。

调研结果表明,不同结构类型建筑的防洪减灾能力差异较大,土石木结构和砖木结构整体性和抗冲抗剪能力较差,面对洪水冲击,易出现承重墙体和梁柱倒塌等结构性损伤;汶川地区的砖混结构大多设圈梁和构造柱,下部为钢筋混凝土基础,整体性较好,砖混结构和框架结构承载能力和抗剪强度较强,建筑破坏以门窗破坏、墙面损伤等非结构性损伤为主。

同时根据调研,公共服务功能和生产经营功能类房屋的整体受损程度要轻于居民住宅房屋,这是由于公共服务用房和生产经营用房大多经过规范设计,充分考虑防灾安全因素,大多采用框架结构,部分拥有围墙等防护措施,而居民住宅房屋大多根据传统经验建造,没有规范设计和计算,同时施工人员未经过正规培训,施工质量难以保障,可见村

镇建筑的规范设计和施工是十分必要的。

研究表明,建筑物规模会影响它对水流冲击的抵抗力<sup>[21]</sup>。基于汶川县砖混结构和框架结构房屋样本数据,分析建筑面积与建筑破坏等级的关系(图9)。由图9可知,建筑面积越小,越容易受到相对严重的破坏,尤其是100 m<sup>2</sup>以下建筑以中等破坏和严重破坏居多。结合实地调研发现,本次调研样本中小面积建筑多为1~2层旧民房,其受灾相对严重主要是因为该级别建筑结构简单,维护不当,结构稳定性相对较差,面对洪水作用容易造成严重破坏。建筑规模对房屋抗冲性的影响在本次调研样本中没有得到明显体现,有待进一步研究验证。

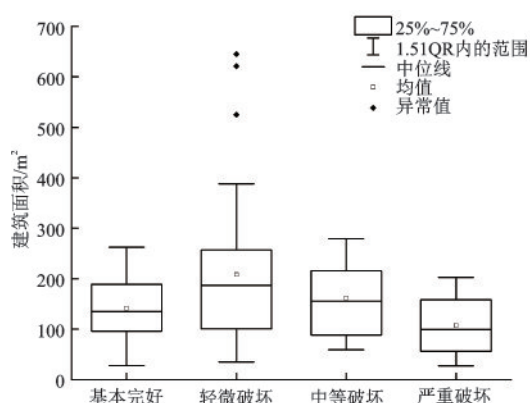


图9 建筑面积与建筑破坏等级的关系

Fig.9 Relationship between the building area and the building damage level

### 3 山区村镇建筑防洪对策和措施

根据前述的山洪对村镇建筑破坏的分析,通过合理的建筑规划布局、加强建筑防洪减灾结构设计以及采取一定的防护措施,可有效减小山洪灾害对村镇建筑的破坏。下面总结了一些提高山区村镇建筑防洪安全性的对策和措施。

(1)加强山区村镇建筑防洪规划,重视村镇建筑的洪灾风险评价。汶川部分乡村建筑多次遭受山洪灾害破坏,可见村镇建筑建设中规划先行的重要性,应认真评估村镇建筑区山洪等灾害的风险,辨识高风险区及其风险程度,确立居民生活生产安全区。根据风险等级和受灾特点,对不同区域确定适合的设防标准,进而制定科学合理的灾害防治措施,保证村镇建筑安全。

(2)通过建筑合理布局,增加建筑群的防洪减

灾能力。沿河村镇建筑群尽可能集中连片建房,采用多排布置,加强前排建筑结构,前后排建筑保持一定的距离,利用建筑遮掩效应,减小山洪对后排建筑的破坏。

(3)加强上部结构的整体性,强化地基基础<sup>[22]</sup>。建筑物尽可能采用防灾性能优越的钢筋混凝土框架结构,多层砖混房屋应设置构造柱和圈梁,屋面构造注意设置防水层。在沿河严重湿陷性黄土、膨胀土和其他软弱土等不良场地建房,应进行地基处理,提高地基承载力,减小不均匀沉降造成的结构破坏,在基础与墙体连接处设置钢筋混凝土基础圈梁,有效抵抗洪水的冲击和冲刷。

(4)加强高危险区的防护措施建设。对于位于山洪灾害强破坏区和较强破坏区的建筑,应通过设置混凝土围挡墙和防护林木等措施,修建达标河堤堡坎,减小洪水直接冲击,以减轻洪水对建筑的破坏程度。

(5)加强村镇房屋的规范设计和施工人员培训。重视村镇房屋的防洪减灾设计,村民建设自住房时,可结合建址条件向村民提供几套经规范设计的房屋设计图以选择。有计划地组织村镇建筑工匠的防灾技术培训,提升其技能水平,保证村镇建筑的施工质量。

## 4 结 论

(1)通过对汶川县2019年“8·20”和2020年“8·17”山洪灾害重点灾区建筑破坏情况的调查分析,结合典型案例研究,分析了各建筑结构类型的破坏特征、建筑破坏程度的空间差异性、建筑遮掩效应和附属屏障保护作用等破坏特点,总结了山洪对村镇建筑物的4种破坏方式。结合山洪灾害破坏特点,从破坏特征和破坏尺度两方面,给出了村镇建筑山洪破坏等级划分标准。

(2)从水深暴露性、选址暴露性和物理脆弱性3方面分析建筑物受灾破坏的主要影响因素。根据随机森林模型因子重要性计算,淹没深度、建筑与河距离、建筑结构类型和相对高程等4项具体指标对建筑破坏程度的贡献度较大,是影响建筑洪灾破坏结果的主要因素。

(3)对影响要素的具体分析表明,洪水对建筑物的破坏在空间上具有明显的破坏强度分区性,在村镇规划和建设工作中应加强对强破坏区建筑的

防洪减灾设计和周边防护工程建设。

(4)根据汶川县两场特大山洪灾害中建筑破坏情况的分析,给出了一些提高山区村镇建筑防洪安全性的对策建议,为山洪灾害频发的西南山区房屋设计提供参考。

致谢:本文部分照片由中国科学院成都山地灾害与环境研究所提供,本文采用的无人机航拍资料由武汉大学柯涛老师课题组提供,在此一并表示诚挚感谢。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部. 中国水旱灾害公报2019[R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2021.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water and drought disaster bulletin 2019 [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2021. (in Chinese)
- [2] 丁海容, 李勇, 赵国华, 等. 汶川地震后岷江上游山洪发育特征与成因分析[J]. 灾害学, 2013, 28(2): 14-19.  
Ding H R, Li Y, Zhao G H, et al. Analysis of flash flood formation character and cause in the upper reaches of Minjiang River after Wenchuan Earthquake[J]. Journal of Catastrophology, 2013, 28(2): 14-19. (in Chinese)
- [3] 杜俊, 肖翔, 蔡道明, 等. 汶川震区山洪泥石流灾害危险性评估[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(3): 77-83.  
Du J, Xiao X, Cai D M, et al. Hazard assessment of mountain torrent debris flow in Wenchuan seismic area [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(3): 77-83. (in Chinese)
- [4] Cui P, Chen X Q, Zhu Y Y, et al. The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards[J]. Natural Hazards, 2011, 56(1): 19-36.
- [5] 王楠, 程维明, 张一驰, 等. 全国山洪灾害防治县房屋损毁风险评估及原因探究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(12): 1575-1583.  
Wang N, Cheng W M, Zhang Y C, et al. Reasons and risk assessment of housing damage in the national mountain torrent disaster prevention county [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(12): 1575-1583. (in Chinese)
- [6] Milanesi L, Pilotti M, Belleri A, et al. Vulnerability to flash floods: a simplified structural model for masonry

- buildings [J]. Water Resources Research, 2018, 54(10): 7177-7197.
- [7] 杨留娟. 山区乡村建筑洪水作用荷载试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.  
Yang L J. Experimental study on the action loading of flood on rural buildings[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [8] 贾雪菲. 北京市砖砌体农宅受山洪泥石流影响的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.  
Jia X F. Experimental study on brick masonry farmhouses influenced by the mudslides of Beijing[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [9] 曹玉芬, 高术仙, 白玉川. 正弦派生曲线弯道水流结构特征实验研究[J]. 水力发电学报, 2020, 39(4): 21-32.  
Cao Y F, Gao S X, Bai Y C. Experimental study on flow structures in sine-generated meandering channel [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2020, 39(4): 21-32. (in Chinese)
- [10] 胡旭跃, 张青松. 连续两弯水流特性的数值模拟研究[J]. 交通科学与工程, 2011, 27(3): 54-59, 93.  
Hu X Y, Zhang Q S. Numerical simulation study of continuous two-curve water flow characteristics [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2011, 27(3): 54-59, 93. (in Chinese)
- [11] Kelman I, Spence R. An overview of flood actions on buildings [J]. Engineering Geology, 2004, 73(3/4): 297-309.
- [12] 建(构)筑物地震破坏等级划分标准: GB/T 24335-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] 民用建筑可靠性鉴定标准: GB 50292-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [14] Jakob M, Stein D, Ulmi M. Vulnerability of buildings to debris flow impact [J]. Natural Hazards, 2012, 60(2): 241-261.
- [15] Maiwald H, Schwarz J. Damage and loss prognosis tools correlating flood action and building's resistance-type parameters [J]. International Journal of Safety and Security Engineering, 2015, 5(3): 222-250.
- [16] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91.  
Zeng C, Cui P, Ge Y G, et al. Characteristics and mechanism of buildings damaged by Debris Flows on 11 July, 2013 in Qipanggou of Wenchuan, Sichuan [J]. Journal of Earth Science and Environment, 2014, 36(2): 81-91. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)

(下转第 23 页)