



## 福建尤溪3.5级地震烈度调查经验与房屋安全隐患分析

陈伟, 张永春, 刘礼诚, 陈三三, 方传极, 全建军, 朱立帆

### Seismic intensity survey and housing safety hazard analysis of the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province

Chen Wei, Zhang Yongchun, Liu Licheng, Chen Sansan, Fang Chuanji, Quan Jianjun, and Zhu Lifan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-169>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 海南岛及邻区地震烈度衰减关系研究

Study on seismic intensity attenuation law in Hainan island and its adjacent areas

地震科学进展. 2020, 50(2): 27-31

#### 西藏昌都地震烈度速报系统建设的相关问题探讨

Discussion on the construction of the quick report system of seismic intensity in Changdu, Tibet

地震科学进展. 2020, 50(9): 32-35

#### 基于无人机影像的皮山地震极灾区烈度评估

Assessment of seismic intensity in the Pishan earthquake extreme disaster area based on UAV images

地震科学进展. 2020, 50(3): 20-24

#### 江西地震预警台网测震仪、强震仪及烈度仪记录噪声与地震事件分析比较

Analysis and comparison of noise and seismic events recorded by seismometers, strong seismometers and intensity meters of Jiangxi Earthquake Early Warning Network

地震科学进展. 2023, 53(8): 367-373

#### 陕西地震烈度速报与预警系统一般站运行对比分析

Comparative analysis on the operation of general stations of Shaanxi earthquake intensity quick report and early warning system

地震科学进展. 2022, 52(8): 388-395

#### 浙江省体育场馆地震灾害风险隐患评估分析及探讨

Analysis and discussion on potential earthquake hazards of gymnasiums in Zhejiang Province

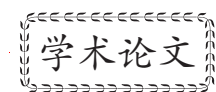
地震科学进展. 2024, 54(5): 311-315



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈伟, 张永春, 刘礼诚, 等. 福建尤溪 3.5 级地震烈度调查经验与房屋安全隐患分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(11): 645-654. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-169

Chen W, Zhang Y C, Liu L C, et al. Seismic intensity survey and housing safety hazard analysis of the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(11): 645-654. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-169



## 福建尤溪 3.5 级地震烈度调查经验与 房屋安全隐患分析

陈 伟<sup>1,2)\*</sup> 张永春<sup>1)</sup> 刘礼诚<sup>1)</sup> 陈三三<sup>1,2)</sup> 方传极<sup>1)</sup> 全建军<sup>1)</sup> 朱立帆<sup>1)</sup>

1) 福建省地震局, 福建福州 350003

2) 福建省震灾风险防治中心, 福建福州 350003

**摘要** 2024 年 6 月 8 日 11 时 16 分, 福建省三明市尤溪县发生 3.5 级地震。地震发生后, 福建省地震局迅速启动 V 级应急响应, 指挥部派出地震现场工作队, 第一时间赶赴震区开展地震现场工作。现场工作队在市县地震和应急管理部門的配合下, 对震区 35 个调查点开展烈度调查, 确定宏观烈度与宏观震中, 圈定宏观烈度等震线。借助无人机技术获知震区房屋的结构类型主要为砖混结构和穿斗木构架, 在此基础上, 进一步分析震区农居在抗震设防方面存在的薄弱环节和潜在的安全隐患。

**关键词** 烈度评定; 宏观烈度; 等震线; 抗震薄弱环节; 安全隐患

中图分类号: P315.9 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)11-0645-10

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2024-169

## Seismic intensity survey and housing safety hazard analysis of the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province

Chen Wei<sup>1,2)</sup>, Zhang Yongchun<sup>1)</sup>, Liu Licheng<sup>1)</sup>, Chen Sansan<sup>1,2)</sup>,  
Fang Chuanji<sup>1)</sup>, Quan Jianjun<sup>1)</sup>, Zhu Lifan<sup>1)</sup>

1) Fujian Earthquake Agency, Fujian Fuzhou 350003, China

2) Fujian Earthquake Disaster Risk Prevention and Control Center, Fujian Fuzhou 350003, China

**Abstract** At 11:16 am on June 8, 2024, a magnitude 3.5 earthquake occurred in Youxi County, Sanming City, Fujian Province. After the earthquake, the Fujian Earthquake Agency quickly activated a Level V emergency response and dispatched a post-earthquake field work investigation team to the affected area. In cooperation with earthquake and emergency management departments at the city and county levels, the team conducted intensity surveys at 35 survey points within the earthquake-affected area. The surveys enabled determination of the macroscopic intensity and macroscopic epicenter, as well as delineation of the isoseismal contour of macroscopic intensity. Using drone technology, the investigation identified brick-concrete structures and column-and-tie timber frame structures as the predominant

收稿日期: 2024-11-10; 采用日期: 2025-03-04。

\* 通信作者: 陈伟(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事震灾风险防治、地震应急救援等研究。E-mail: chenwei-6666@163.com。



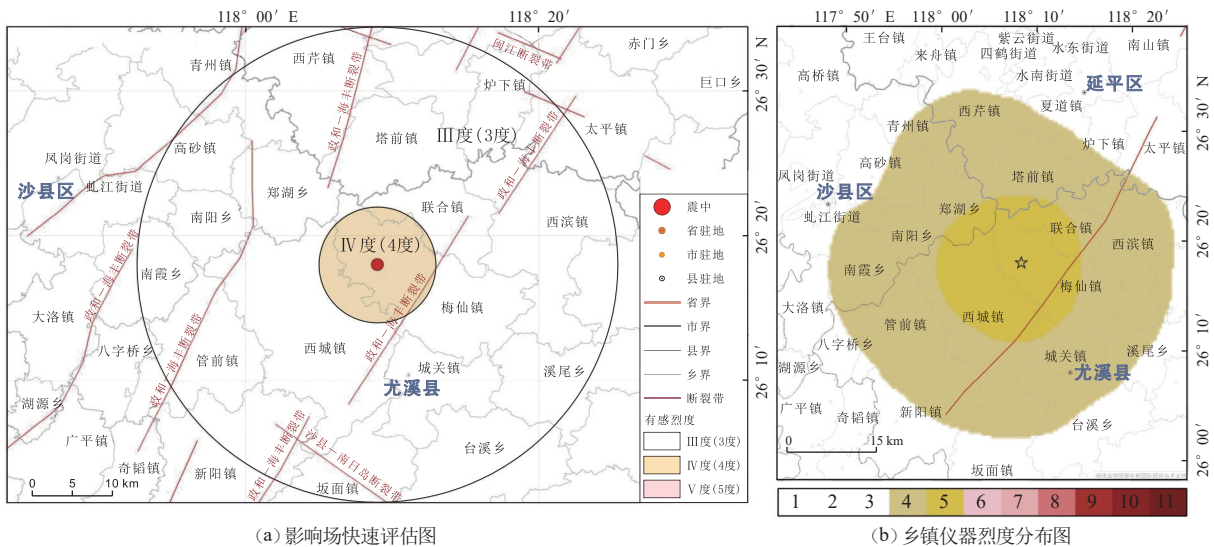
housing types in the earthquake-stricken areas. Based on these findings, further analysis was conducted to identify weak points in seismic fortification and potential safety hazards in rural residential buildings in the affected areas.

**Keywords** intensity evaluation; macroscopic intensity; isoseismal contour; weak anti-seismic links; safety hazards

## 0 引言

北京时间 2024 年 6 月 8 日 11 时 16 分, 福建省三明市尤溪县(26.30°N, 118.15°E)发生 3.5 级地震, 震源深度 8 km。福建南平市、龙岩市有感。三明市尤溪县全县有感, 震中震感强烈, 城关、西城、梅仙 3 个乡镇有明显震感, 其他乡镇有轻微震感。没有人

员伤亡和房屋受损, 尤溪县城高考考点未受影响。大田部分乡镇轻微有感, 明溪、永安高楼层轻微有感, 清流部分乡镇轻微有感, 沙县大洛镇有明显震感。快速评估结果推测, 震中烈度为Ⅳ度(4 度)(图 1a); 仪器烈度结果显示, 震中烈度达到Ⅴ度(5 度)(图 1b), 长轴方向不明显。



(a) 影响场快速评估图

(b) 乡镇仪器烈度分布图

图 1 福建尤溪 3.5 级地震背景影响场

Fig. 1 Background influence field of the  $M_{3.5}$  earthquake in Youxi County, Fujian Province

尤溪县位于福建省中部, 戴云山脉北段, 地貌类型以中山、低中山和中低山为主。区内主要发育北东向政和一海丰断裂带、北西向闽江断裂带、沙县—南日岛断裂带 3 条地震构造带。史上曾发生过 1067 年南平东南 5 $\frac{1}{4}$ 级地震, 位于此次地震震中的东北面约 18.6 km 处。震区附近房屋结构类型多以砖混结构和穿斗木构架古民居为主。

## 1 现场调查

### 1.1 应急响应与调查步骤

福建省地震局指挥部派出地震现场工作队, 开展震害调查与烈度评定。每一次地震, 都是对当地房屋抗震设防的检验; 每一次现场调查, 都是对当地房屋抗震薄弱环节和安全隐患的分析。

地震发生后, 福建省地震局迅速了解震情、灾情, 启动Ⅴ级应急响应, 成立福建尤溪 3.5 级地震指

挥部。省、市、县地震部门迅速启动应急预案, 指挥部于震后 35 min 派出现场工作队赶赴震区开展地震现场工作。

现场工作队到达尤溪后, 立即与先期开展应急工作的尤溪县应急管理局会合, 了解震区地震工作进展, 分析研究震情形势, 制定现场工作方案, 联合开展震害调查、烈度评定及科普宣传等工作, 协助震区政府做好地震应急和安定民心工作。

现场工作队分两组开展现场调查, 考虑到地震发生时正值高考期间, 现场 1 组首先赶到尤溪县唯一高考点尤溪一中, 与组织高考工作的县教育局、县一中领导沟通对接, 详细了解考点震情, 对考生和监考老师进行解答和安抚, 并提醒地震避险注意事项, 保证后续考试正常进行(图 2a); 现场 2 组根据任务分工, 直接奔赴震中附近开展烈度调查。调查步骤如下:



图 2 福建尤溪 3.5 级地震现场调查

Fig. 2 On-site investigation following the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province

(1) 在现场调查过程中, 现场工作队遵循灵活、高效的调查形式, 在调查现场分配调查任务, 在行进过程中制定调查路线, 并根据阶段性调查结果随时调整路线(图 2b)。

(2) 现场调查方式, 以询问人的感觉和器物反应为主, 对老旧民居和危房进行震害调查, 对群众反映的房屋震害进行复核(图 2c)。

(3) 无人机调查是获取震区灾情信息的最快速手段之一。此次现场调查, 也对极震区周边多处群众反映强烈的重要调查点开展无人机航拍辅助调查, 快速获取震区房屋结构类型、灾情信息及安全隐患。

(4) 每结束一个调查点的工作后, 现场工作队各调查组都将该调查点的房屋结构、震感震害、烈度初步评定结果及时向指挥部汇报, 使指挥部能实时、全面掌握震情和现场工作进展。

(5) 在开展调查的同时, 在乡镇、村干部和社会力量的配合下, 现场工作队还承担解答当地群众疑惑、消除群众恐慌情绪的任务。市县地震与应急管理部门同志也深入村镇、农户家中, 发放地震科普宣传材料、宣传普及防震减灾、应急避险和自救互救等科普知识, 维护社会秩序稳定和端午假期安定。

综上, 此次尤溪 3.5 级地震现场调查工作, 于 6 月 8 日 11:50 赶赴灾区, 至 6 月 9 日 16 点结束现场调查工作。通过一天半时间的密集调查, 现场工作队快速梳理了所有调查资料, 确定了此次地震的震中烈度, 初步圈定宏观烈度等震线, 现场第一时间提交了地震现场调查工作小结。收队后, 现场工作队继续对所有现场调查资料进行汇总统计, 进一步确定了此次地震的宏观震中, 完善了宏观烈度等震线, 提交了地震现场调查工作总结和现场调查报告。现场调查工作流程如图 3 所示。

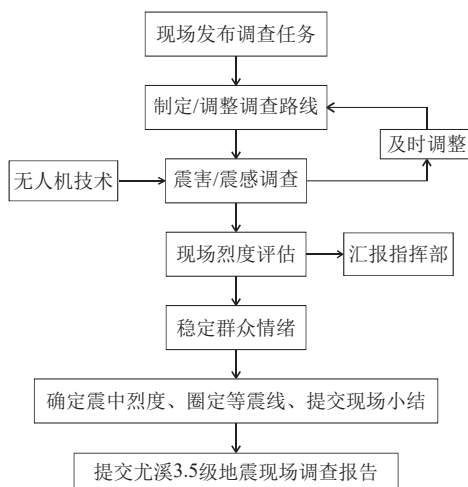


图 3 现场调查工作流程

Fig. 3 On-site investigation workflow

## 1.2 调查路线与调查点

此次地震调查路线, 大致分为东、西、南、北 4 个方向。重点任务是: ①确定震中烈度, 震中是否存在 VI 度震害; ②参照影响场和仪器烈度结果, 找出 V 度等震线边界。现场主要有 3 支队伍: 由省地震局为主的现场调查 1 组, 由震区附近台站人员为主的现场调查 2 组, 以及由市地震局、县应急局组成的震情考察组。其中, 现场 1 组在调查了高考点震情后, 承担了震区东南面、南面、西北面 3 个方向的烈度调查; 现场 2 组主要承担震中附近和震区北面的烈度调查; 市县震情考察组主要对震区几处代表性调查点进行了震情考察(图 4)。

此次尤溪地震现场工作, 先后对城关镇、梅仙镇、西城镇、联合镇 4 个镇, 35 个调查点开展了震害调查与烈度评定(图 4)。此外, 还委托县应急管理局地震办同志, 收集控制等震线边界的村庄和一些鞭长莫及的偏远村庄的震情信息和震害照片, 完善地震烈度图的绘制。



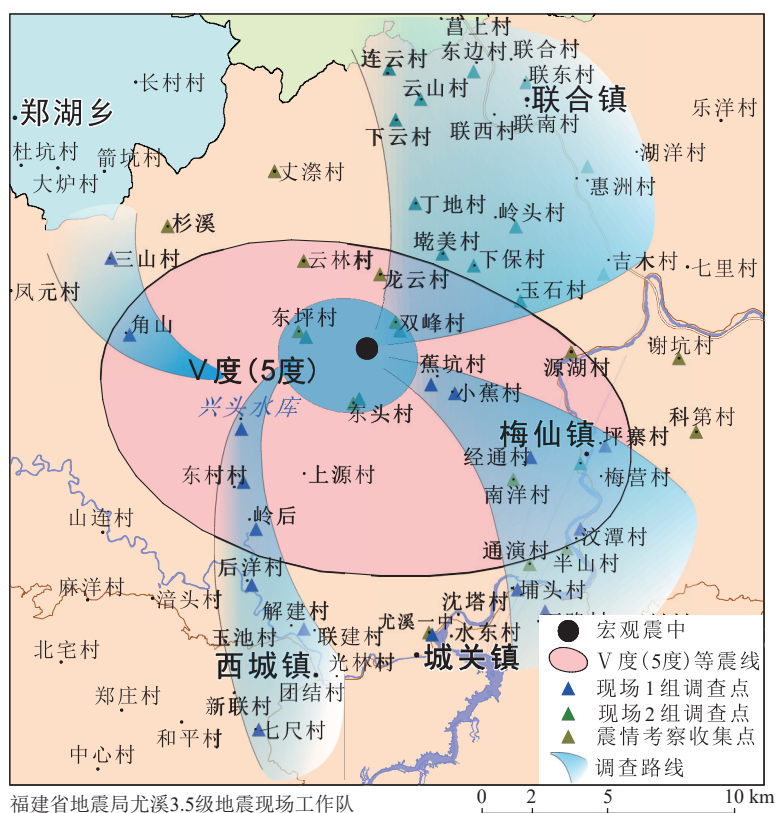


图4 福建尤溪 3.5 级地震烈度与调查点分布图

Fig. 4 Distribution map of seismic intensity and survey points for the  $M_{3.5}$  earthquake in Youxi County, Fujian

## 2 烈度评定结果

### 2.1 宏观烈度与宏观震中

鉴于人的感觉的主观性,此次烈度调查以器物反应作为主要评定指标,并对人的感觉询问尽量详细。经调查,此次尤溪 3.5 级地震的宏观震中烈度为 V 度(5 度),宏观震中位于三明市尤溪县梅仙镇东坪村与双峰村之间( $26.281^{\circ}\text{N}$ ,  $118.162^{\circ}\text{E}$ ),位于微观震中东南面约 2.4 km,表现为陡边坡发生一定程度掉土掉块地质灾害。

V 度等震线呈北西向近椭圆形分布,长轴长约 21.5 km,北西自角山村,南东达坪寨村;短轴长约 13 km,北东自龙云村,南西至岭后村;面积约  $217\text{ km}^2$ 。主要涵盖城关镇、梅仙镇、西城镇 3 个镇,涉及梅仙镇东坪村、云林村、龙云村、双峰村、东头村、蕉坑村、小蕉村、经通村、南洋村、梅山村、九都村、坪寨村、梅营村、汶潭村、半山村、源湖村,城关镇沈塔村(北部),西城镇东村村、上源村、联建村(北部)、三山村(东部)等 21 个行政村(图 4)。划分依据优先考虑房屋掉瓦掉砖、墙体出现细缝、不稳定器物倾倒、架上物品摇动、盛水容器溢水 etc 客观证据,辅以外人员感受、睡梦人员惊醒等主观感受共

同判定。

对比宏观烈度与仪器烈度发现,此次地震宏观烈度 V 度区面积小于仪器烈度图,与区内烈度仪器分布少、靠推测得出近似圆形的仪器烈度等震线有关。宏观烈度与结构抗震性能密切相关,而仪器烈度是由峰值加速度 PGA 和地震动与烈度统计关系获得,两者尚不能一致<sup>[1-2]</sup>。2023 年甘肃积石山 6.2 级地震,震中宏观烈度为 VIII 度,仪器烈度却高达 9.5 度,两者就出现较大差异<sup>[2]</sup>。

此外,此次地震位于区域上的北东向政和一海丰断裂带展布范围内,距离带内最近的九阜山—盖竹头次级断裂( $F_4$ )约 1.6 km。该区位于政和一海丰断裂带中段,历史上曾发生过 1067 年南平东南  $5\frac{1}{4}$  级地震,距此次震中约 18.6 km。调查发现,此次地震的等震线长轴呈北西西向,与断裂走向不一致,但与震源机制解的节面 2 走向吻合(图 5),结合此次地震震级属中小地震,因此认为此次地震为本底地震,与区域构造关系不大。

### 2.2 震害与震感特征

通过烈度调查,辅以无人机航拍,揭示震区房屋结构类型主要为砖混结构和穿斗木构架。在此次地

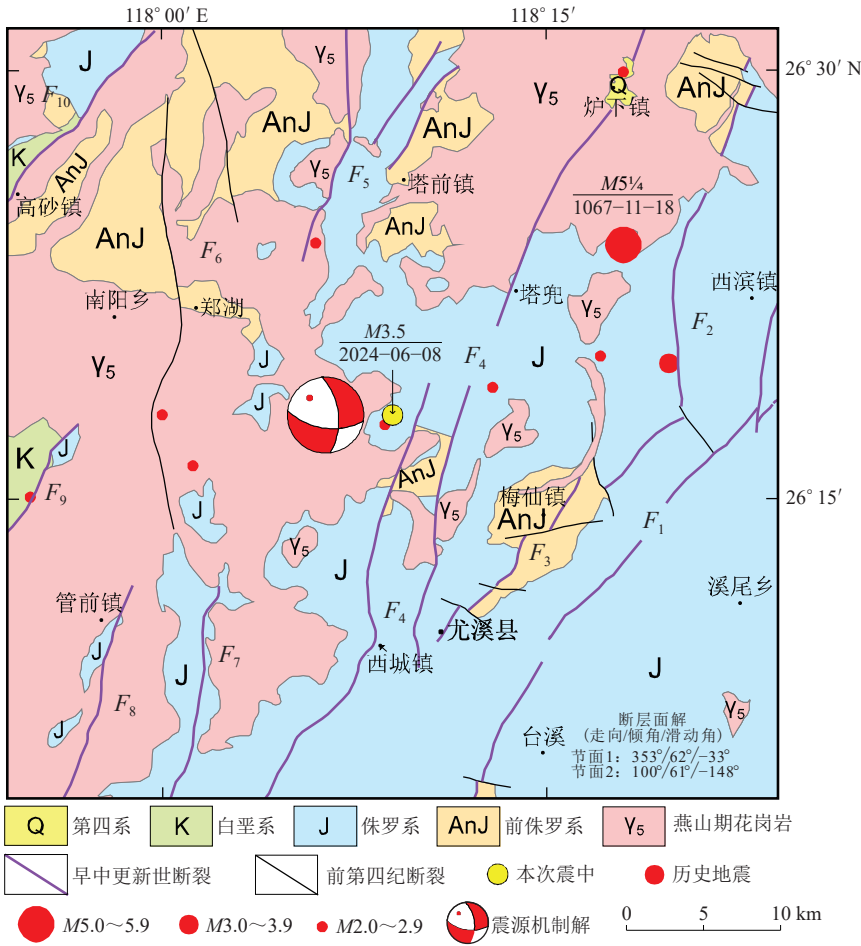


图 5 福建尤溪 3.5 级地震构造与震源机制解图

Fig. 5 Seismic intensity and survey point distribution map for the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province

震中，除个别老旧房屋局部掉块、掉瓦外，基本没有受到影响。此次地震调查，主要以人的感觉和器物反应为主，V 度区个别老旧民居存在轻微震害现象，IV 度区则基本以人的感觉为主，具体震害与震感特征归纳如下：

(1) V 度区震害特征，主要表现为：震感强烈，地声明显，室内普遍、室外多数人有感觉，少数人惊逃户外，门窗、屋顶颤动作响，悬挂物晃动，少数架

上小物品摇动，个别架上的空塑料桶掉落，个别放置不稳定器物翻倒，水晃动并从盛满的容器中溢出；老旧房屋灰土掉落，个别穿斗木构架房屋檐瓦掉落，个别未经设防的砖混结构房屋墙体原有裂缝扩展或掉砖掉瓦掉块；先前崩塌的不稳定陡边坡掉土掉块，切坡建房形成的屋后高陡边坡掉砂掉土(图 6)。

(2) IV 度区震感特征，主要表现为：震感较强，有地声，室内多数人有感觉，门窗作响，悬挂物摆



图 6 福建尤溪 3.5 级地震 V 度区典型震害特征

Fig. 6 Typical seismic damage characteristics in the intensity V area of the M3.5 earthquake in Youxi County, Fujian Province

动, 器皿作响。

(3) 重要生命线工程排查, 现场工作队还对位于震中附近的重要生命线工程兴头水库开展隐患排查, 坝体完好, 未发现新增裂缝、沉降等宏观震害, 未受到地震破坏。

### 3 烈度评定经验

中小地震现场震害调查和烈度评定, 以往大多只是确定震中烈度, 认为Ⅵ度以下地震烈度难以调查, 多是依靠仪器测定地震烈度。但受限于仪器分布, 大多地区还不具备仪器烈度条件。通过此次 3.5 级地震烈度评定证明, V 度宏观烈度还是有明显迹象可循, 通过拆解《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 的各评定指标, 划分优先等级, 统一评定尺度, 再参考仪器评定, 就能综合圈定 V 度等震线。

(1) 评定指标优先等级划分。中小地震烈度调查, 调查方式主要以询问人的感觉和器物反应为主, 其中, 应优先以器物反应为主, 人的感觉为辅, 因为人的感觉具有较大的主观性, 群众在描述时可能存在一定程度夸大或缩小, 尺度难以统一; 而器物的反应则相对客观, 易于统一尺度。

(2) 器物反应优先等级划分。V 度地震烈度调查中的器物反应, 同理应优先以不稳定器物、盛水容器的反应为主, 悬挂物晃动幅度、门窗屋顶颤动作响程度为辅, 前者尺度易于统一。调查队员应注意逐项询问这些细节, 若出现架上桌上物品摇动、不稳定器物倾倒、水从容器中溢出等情况, 即评定为 V 度。若只是悬挂物摆动、器皿作响, 则只能评定为Ⅳ度。

(3) 存在轻微震害现象。V 度地震烈度, 还会出现个别房屋轻微震害的情况, 如灰土掉落, 个别老旧房屋墙体抹灰层出现细微裂缝或原有裂缝扩展, 个别屋顶烟囱掉砖、檐瓦掉落等, 这些轻微震害现象基本只发生在 A1、A2 类房屋类型, 其破坏程度也只相当于《建(构)筑物地震破坏等级划分》(GB/T 24335—2009) 中的 I 级破坏等级。此外, 此次地震还出现陡边坡掉土掉块的轻微地质灾害, 地质灾害一般出现在Ⅵ度以上地区, 但对于不良地质体和地灾隐患点, 在 V 度时也会发生一定程度破坏。调查时应注意收集这些轻微破坏证据, 若出现上述情况, 则判为 V 度。

(4) 人的感觉区分。Ⅳ度以上地震烈度, 多数人有感, 这里主要区分室外多数人有感、还是室内多数人有感, 前者代表 V 度、后者代表Ⅳ度。除此之外,

若地震发生在夜晚, 则可继续关注下从睡梦中惊醒的人数比例, 多数代表 V 度、少数代表Ⅳ度。

(5) 统一评定尺度。中小地震烈度调查存在一定主观性, 现场各调查组应连夜汇总当日各组调查资料, 交流探讨各调查点震情与震害特征, 统一烈度评定标准与尺度, 部署次日工作任务, 确定需要开展补充调查的位置。

### 4 抗震薄弱环节与安全隐患分析

每一次现场调查, 都是对当地房屋抗震薄弱环节和安全隐患的分析。此次地震, 虽然没有造成明显震灾, 但在烈度调查过程中, 发现震区部分房屋抗震性能较差, 选址和基础也存在较大安全隐患。

#### 4.1 砖混房屋不设防

震区砖混结构房屋大多未经抗震设防, 属于《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020) 中的 B 类房屋类型。该类不设防砖混房屋又可归纳为两种类型: 第 1 类是有圈梁、无构造柱; 第 2 类是无圈梁、也无构造柱, 这两种结构基本代表了福建山区砖混结构农居的特征。震区砖混结构房屋抗震薄弱环节主要体现在: ①大多没有设置构造柱, 纵横墙交接作用差; ②部分房屋仅有地圈梁、无上圈梁, 甚至未设地圈梁; ③另一部分虽有圈梁, 但也多处被窗户截断而未封闭, 整体性差; ④水泥砂浆标号较低, 承重墙体不稳定(图 7a)。

上述抗震薄弱环节在震中及震区西部山区较为严重, 砖混自建房屋大多不满足《建筑抗震鉴定标准》(GB50023—2009) 要求, 抗震性能较差。这类没有构造措施或构造措施不当的自建房屋, 在多次强震一大震的检验中破坏最为严重。在 2023 年积石山 6.2 级地震中, 未设防砖混结构是破坏最为普遍的房屋结构之一, 主要表现为因房屋结构体系不完整导致墙体破坏和纵横墙交接处开裂破坏<sup>[3-5]</sup>。在 2024 年日本能登半岛 7.6 级地震中, 严重破坏与毁坏的 2.2 万栋建筑大多是抗震性能较差的老旧房屋, 当地 2018 年末达到抗震设防水准的房屋只有 51%, 不设防房屋较多是造成此次地震人员伤亡的主要因素之一<sup>[6-7]</sup>。

抗震构造措施对房屋抗震性能十分重要, 这点从同一院落设有圈梁构造柱的房屋基本完好、而不具备构造措施的房屋破坏严重可以说明, 即使不太完备的构造措施也能大大提高房屋的抗震性能<sup>[8-9]</sup>。因此, 对于震区第 2 类既无构造柱、又无圈梁、水泥砂浆标号不足的房屋, 如同积木搭盖, 若地震烈度比





图 7 震区房屋抗震薄弱环节与地质灾害隐患

Fig. 7 Seismic vulnerability of buildings and geological disaster hazards in the earthquake-stricken area

此次提升 1 度, 可能出现明显震害。

#### 4.2 坡上盖房基础弱

建于山坡处的房屋, 大多直接采用形状不规则的毛石垒起, 且毛石间没有水泥砂浆固定, 十分松散; 房屋地基未经平整, 为抵消坡度影响, 采用从屋后向屋前将毛石逐渐垒高的方法, 导致屋前毛石受到屋后毛石的推挤, 极不稳定 (图 7b); 上部房屋有的采用木结构, 有的采用砖混结构, 其中砖混结构房屋自重较大、基础薄弱、且未设置构造柱和圈梁, 多数墙体已出现不均匀沉降裂缝。这类房屋在地震作用下, 极易发生毛石基础坍塌进而导致房屋整体结构垮塌或倾倒, 存在极大安全隐患。

若采用坡上建房, 应处理好地基和基础; 在结构选择上, 相比于无柱砖混结构, 建议采用底框架砖混结构, 其抵抗滑坡破坏的能力更强; 在房屋方向上, 尽量保持房屋纵轴 (长边) 与斜坡走向一致, 房屋纵轴与斜坡走向夹角越小, 越有利于降低滑坡对房屋的影响; 在长宽比设置上, 在房屋纵轴近似平行斜坡走向且面积相似的前提下, 长宽比大的砖混房屋受滑坡破坏的程度更低<sup>[10]</sup>; 且因地震存在地形放大作用, 应避开高陡边坡, 建于缓坡地带。

#### 4.3 依山选址风险高

震区地处低山丘陵地带, 居民住房选址大多依山而建, 存在很大的随意性。相当部分农村房屋建于山坡、坡脚或山谷, 有的甚至建于地质灾害的危险地带, 因此, 应特别注意地震可能引发的滑坡、崩塌、泥石流等次生地质灾害。

近年来因极端暴雨或暴雨叠加导致山洪灾害事件层出不穷。2021 年河南郑州“7·20”特大暴雨灾害, 直接诱因是极端暴雨<sup>[11]</sup>; 2022 年青海大通“8·18”山洪灾害, 直接诱因是降雨叠加<sup>[12]</sup>; 就在此次震后 8 天,

同属低山丘陵地貌的福建龙岩山区发生了“6·16”特大暴雨灾害, 造成降雨型滑坡 3951 处、道路堵塞 136 处、房屋损毁 22 间, 海拔越高、距道路和河流越近, 滑坡越集中<sup>[13]</sup>, 其中建于上杭县太拔镇清源山山前冲沟出口的清源古寺就因选址不当而被滑坡体整体掩埋。除上述单独暴雨因素外, 研究还发现, 地震和暴雨的耦合作用对边坡稳定性的影响大于地震、暴雨单独作用的叠加对边坡稳定性影响<sup>[14]</sup>。此次调查中就发现震中附近的双峰村—东坪村陡坡路段, 出现震前因连日降雨导致塌方失稳、震后失稳陡坡又出现新的掉块的叠加效应 (图 7c)。因此, 应警惕汛期和地震的叠加效应, 山区选址应尽量避免或远离易引发地质灾害的危险地带, 应避开陡崖、35°以上陡坡、峡谷、冲沟、山口、软土地带以及岩石破碎地带。

#### 4.4 切坡建房隐患大

震区西部山区常见傍山而建的房屋采用切坡建房的方法, 过度开挖破坏了山体结构平衡, 使坡脚形成临空面, 导致坡脚剪应力增大; 且房屋紧邻山坡, 没有足够的安全距离, 没有采取任何防护措施。研究表明, 人工切坡的边坡稳定性受自然坡度和开挖进尺影响。以角山村为例, 当地原始坡度的优势范围约在 20°~40°, 村民建房多采用近垂直、大进尺高陡切坡 (图 8)。参考加拿大 Geo-studio 岩土工程仿真分析软件计算结果, 当坡度 20°~40°斜坡开挖 10 m, 坡脚剪应力相比未开挖骤升幅约 3~10 倍, 安全系数降幅约 17%~39% (表 1)。当坡度为 20°、30°、40°, 开挖进尺分别超过 13.2 m、10.1 m、2.5 m 时, 切坡进入失稳状态<sup>[15]</sup>。借助无人机调查显示, 当地切坡建房的普遍开挖进尺在 15~20 m, 随时存在滑坡、崩塌而致使房屋被冲垮的危险。此外, 在地震作用下, 高陡切



坡对地震动峰值的放大作用易导致那些原本逼近失稳临界状态的切坡提前进入失稳状态,从而诱发滑坡、崩塌等次生地质灾害。

此次地震中,该类房屋居民大多反映屋后切坡出现掉块掉土现象,也证实了这一点,说明该区切坡

稳定性遭受一定程度破坏,加剧了失稳状态。当再次遭遇地震、暴雨或两者叠加的触发条件时,就有可能出现滑坡、崩塌等地质灾害。因此,切坡隐患应引起政府高度重视,做好阶状放坡、坡面防护、坡脚支档和截水排水,保持安全距离,排除安全隐患。



图 8 震区高陡切坡建房分布与特征

Fig. 8 Distribution and characteristics of houses built by cutting into high and steep slopes in the earthquake-stricken area

表 1 3 类坡度不同开挖工况下,坡脚剪应力与边坡安全系数变化幅度统计表

Table 1 Statistical table of the variation ranges of the shear stress at the foot of the slope and slope safety factor under different excavation conditions for three slope types

开挖进尺/m	20°		30°		40°	
	坡脚剪 应力增幅/%	边坡安全 系数降幅/%	坡脚剪 应力增幅/%	边坡安全 系数降幅/%	坡脚剪 应力增幅/%	边坡安全 系数降幅/%
2	3	0	189	1	143	2
4	72	1	383	2	269	5
6	145	13	580	9	353	18
8	272	22	871	13	468	31
10	316	29	982	17	527	39

5 结论与建议

5.1 主要结论与经验

此次尤溪 3.5 级地震是福建中西部地区自 2017 年宁化 3.6 级地震以来、沉寂多年再次发生的 3 级以上地震,能代表福建中西部地区的本底地震活动水平,虽然震级小、破坏轻,却能够反映出当地农居抗震薄弱环节与安全隐患。此次地震烈度评定工作,是福建地区首次尝试在中小地震现场调查中圈定宏观烈度等震线的做法,为后续中小地震现场调查和科

学考察提供示范作用。现场工作队调查了震区城关镇、梅仙镇、西城镇、联合镇 4 个镇共计 35 个调查点,得出以下主要结论与经验:

(1)此次地震全县有感,震中及周边区域震感强烈,没有人员受伤和房屋受损情况,水库等重要生命线工程运行正常,总结为“有震感、无震灾”。

(2)此次地震的宏观震中,位于梅仙镇东坪村与双峰村之间,震中烈度为 V 度(5 度)。V 度等震线长轴约 21.5 km,短轴约 13 km,面积约 217 km<sup>2</sup>。

(3) 此次地震发生在学生高考时段, 现场工作队针对此特殊时段的震情, 第一时间对高考点进行风险排查, 保障学生高考平稳进行。

(4) 对重要调查点开展了无人机调查, 在震区房屋结构、灾情快速获取、安全隐患等方面都取得了良好效果, 发现了震区砖混结构房屋的安全隐患, 建议作为现场调查组标配。

(5) 此次地震现场调查, 在震区图件、向导、无人机、震情收集等方面, 得到市县地震、应急部门和当地政府的大力支持与配合, 工作效率大大提高, 调查结果更加全面, 对今后地震现场工作的省、市、县三级地震与应急管理部门联动协作起到示范作用。

## 5.2 抗震薄弱环节与安全隐患建议

(1) 通过震害调查发现, 震区部分建筑物的选

址、地基处理和房屋结构设计均存在薄弱环节和地质灾害安全隐患, 建议对口单位予以评估鉴定和加固改造, 并加强对农村民居的建设规划和管理服务工作。

(2) 鉴于震区及福建中西部山区农村民居存在的未经抗震设防、抗震性能偏低的普遍情况, 建议结合福建省乡村振兴、新农村建设等发展规划, 积极推进农村民居安全隐患排查, 有序开展农村民居抗震改造, 切实提高农村民居的抗震性能。

(3) 针对当地山区常见的穿斗木构架房屋, 其独特的榫卯结构具有一定的耗能减震作用和良好的抗震性能, 该类结构经历过多次大震检验<sup>[16-17]</sup>, 建议当地山区保留穿斗木构架房屋, 修缮历史悠久的穿斗木古民居, 保留当地传统穿斗木构架民居建筑风格。

## 参考文献

- [1] 孙柏涛, 闫佳琦, 李山有. 宏观地震烈度发展与其用途的演变 [J]. 地震工程与工程振动, 2019, 39(2): 1-8  
Sun B T, Yan J Q, Li S Y. The development of macroseismic intensity and the evolution of its use[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(2): 1-8
- [2] 蒋伟, 王永志, 袁晓铭, 等. 2023 年甘肃积石山  $M_{\text{s}}6.2$  地震宏观灾害特征与若干思考 [J]. 防灾减灾工程学报, 2024, 44(1): 1-11  
Jiang W, Wang Y Z, Yuan X M, et al. Macroscopic hazard characteristics of the 2023 Gansu Jishishan  $M_{\text{s}}6.2$  earthquake and some proposals[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 1-11
- [3] 岳峰, 董建华, 董鹏飞, 等. 甘肃积石山  $M_{\text{s}}6.2$  地震高烈度区震害特征及机理分析 [J]. 地震工程学报, 2024, 46(4): 759-767  
Yue F, Dong J H, Dong P F, et al. Characteristics and mechanism of seismic damage of residential buildings in high-intensity areas of Jishishan  $M_{\text{s}}6.2$  earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(4): 759-767
- [4] 陆明勇, 赵晓霞, 王建平, 等. 甘肃积石山 6.2 级地震灾害特征探讨与思考 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(7): 373-382, 434  
Lu M Y, Zhao X X, Wang J P, et al. Analysis of the disaster characteristics of the  $M6.2$  earthquake occurring in Jishishan County, Gansu Province, China, in 2023[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(7): 373-382, 434
- [5] 王绪, 魏本勇, 文彦君, 等. 甘肃积石山  $M_{\text{s}}6.2$  地震灾情特征及启示 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(7): 383-394  
Wang X, Wei B Y, Wen Y J, et al. Disaster characteristics and policy implications of the  $M_{\text{s}}6.2$  Jishishan earthquake in Gansu Province[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(7): 383-394
- [6] 高孟潭. 日本能登半岛 7.6 级地震的教训与启示 [J]. 中国应急救援, 2024(3): 76-80  
Gao M T. Lessons and enlightenment from the Noto Peninsula  $M7.6$  earthquake[J]. China Emergency Rescue, 2024(3): 76-80
- [7] 高娜, 高伟, 严瑾, 等. 日本能登半岛 7.6 级地震灾害特点分析 [J]. 中国应急救援, 2024(3): 81-85  
Gao N, Gao W, Yan J, et al. Analysis of disaster characteristics of the Noto Peninsula  $M7.6$  earthquake in Japan[J]. China Emergency Rescue, 2024(3): 81-85
- [8] 聂桂波, 杨永强, 张昊宇, 等. 甘肃积石山地震村镇典型建筑震害及成因分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(3): 214-222  
Nie G B, Yang Y Q, Zhang H Y, et al. Cause analysis and typical damage of town and village buildings of the Jishishan earthquake in Gansu Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(3): 214-222
- [9] 杨永强, 田健叶, 周宝峰, 等. 甘肃积石山 6.2 级地震村镇建筑震害调查与分析 [J]. 地震工程与工程振动, 2024, 44(2): 208-217  
Yang Y Q, Tian J Y, Zhou B F, et al. Investigation and analysis of seismic damage of rural buildings caused by  $M_{\text{s}}6.2$  earthquake in

- Jishishan of Gansu Province[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2024, 44(2): 208-217
- [10] 谢强, 李雨桐, 徐先宇, 等. 滑坡诱发农村山区砖混结构变形及演化规律研究 [J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2024, 56(2): 166-175
- Xie Q, Li Y T, Xu X Y, et al. Study on the deformation and evolution law of brick-concrete structures in rural mountainous areas induced by landslides[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2024, 56(2): 166-175
- [11] 刘明潇, 朱勇杰, 胡昊, 等. 城市新区极端雨洪汇流淹没特性与致灾机理调查研究: 以郑州“7·20”特大暴雨(郑东新区)为例 [J]. 水利学报, 2024, 55(3): 288-300
- Liu M X, Zhu Y J, Hu H, et al. Survey research on characteristics of extreme rainstorm flood and disaster-causing mechanism in urban new district: Taking Zhengdong new district in Zhengzhou's "7·20" heavy rainstorm as an example[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(3): 288-300
- [12] 和海霞, 李博. 青海大通“8·18”山洪灾害特征及风险分析 [J]. 自然资源遥感, 2024, 36(2): 135-141
- He H X, Li B. Characteristics and risk analysis of the flash flood occurring in Datong of Qinghai Province on August 18, 2022[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(2): 135-141
- [13] 陈博, 张灿灿, 李振洪, 等. 福建龙岩市 2024 年“6·16”特大暴雨诱发滑坡发育特征及其调控因子分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(11): 2145-2155
- Chen B, Zhang C C, Li Z H, et al. Developmental characteristics and controlling factors of landslides triggered by extreme rainfalls on 16 June 2024 in Longyan, Fujian Province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11): 2145-2155
- [14] 何专, 姚令侃. 地震和暴雨工况下边(滑)坡稳定性分析方法评价 [J]. 水土保持通报, 2009, 29(3): 178-182
- He Z, Yao L K. Assessment on methods of analyzing slope (landslide) stability under earthquake and rainstorm[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2009, 29(3): 178-182
- [15] 杜显祥, 房浩, 曹佳文. 建房切坡条件下边坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(5): 40-47
- Du X X, Fang H, Cao J W. Analysis of slope stability under the condition of cutting for house-building[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(5): 40-47
- [16] 孙柏涛, 张昊宇, 闫培雷. 芦山 7.0 级地震穿斗木构架房屋震害特点及原因简析 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 1-11
- Sun B T, Zhang H Y, Yan P L. Earthquake damage and feature analysis of Chinese traditional timber frame structures subjected to the Lushan 7.0 earthquake[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(3): 1-11
- [17] 王现伟, 孙柏涛, 陈洪富. 西南地区穿斗式木结构民居构造特点及震害特征分析: 以贵州山区为例 [J]. 地震研究, 2024, 47(2): 290-299
- Wang X W, Sun B T, Chen H F. Analysis of architectural and structural characteristics and typical earthquake damage to the Chuandou-type timber frame in Southwest China: A case study of the mountainous areas in Guizhou Province[J]. Journal of Seismological Research, 2024, 47(2): 290-299