

# 基于倾斜摄影的2021年云南漾濞 $M_s$ 6.4 地震典型震害调查分析\*

张方浩, 杜浩国, 张原硕, 张建国, 卢永坤, 曹彦波

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 倾斜摄影建立的高分辨率三维模型, 能够呈现建筑物立体视觉效果, 便于对建筑物结构、墙体、门窗等详细破坏情况进行分析, 弥补了传统遥感影像只能获取建筑物顶部信息的局限。2021年5月21日漾濞 $M_s$ 6.4地震发生后, 利用多旋翼无人机、采用倾斜摄影的方式拍摄了Ⅷ度区的苍山西镇花椒园村背阴坡小组建筑物多个角度影像, 建模生成高分辨率三维模型, 并对破坏最严重的某户民居的破坏情况和原因进行了分析, 认为造成破坏加重的不利因素有: 山体的放大效应、边坡的放大效应、多次地震震害叠加效应以及建筑墙体自身缺陷。

**关键词:** 震害调查; 倾斜摄影; 高分辨率; 漾濞 $M_s$ 6.4地震

**中图分类号:** P315.94      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)03-0481-09

## 0 引言

随着遥感技术的推广、遥感影像分辨率的提高和遥感信息提取技术的发展, 遥感技术逐渐成为快速获取地震灾情信息、震后应急和震害快速评估的有效手段(赵福军, 2010)。

无人机航空遥感系统具有实时性强、机动灵活、影像分辨率高、成本低等优点(雷添杰等, 2011), 在地震造成通讯和交通中断、人员无法进入、信息传递受阻的地区, 可快速获取灾区遥感影像数据, 故在震后灾情获取和震害调查中扮演着越来越重要的角色。

近年来倾斜航空摄影的发展, 为典型工程结构的震害调查和科考提供了新的手段。倾斜摄影技术通过飞行器搭载一种或多种传感器, 拍摄建筑物多个角度影像, 建模生成的高分辨率三维模型展现了建筑物丰富的细节层次和侧面纹理信息, 弥补了传统遥感影像只能获取建筑物顶部信息的局限。研究人员利用高分辨率倾斜影像和三维点云数据, 建模生成三维影像获取建筑物侧面和顶部纹理影像, 分析屋顶和外墙破坏特征(帅向华等, 2018; Galarreta *et al.*, 2015; 陈文凯等,

2008), 并采用人工目视解译、房屋倾斜程度计算、房屋立面裂缝识别等方法评估单体或群体建筑物的破坏程度(林月冠, 2016; 荆帅军等, 2019; 杜浩国等, 2019)。倾斜摄影技术可以全方位获取建筑结构震害情况的影像, 然后根据三维建模形成的点云数据测量建筑结构破坏的定量参数如裂缝宽度等, 为数值分析结构三维实体模型提供便利条件。

2021年5月21日漾濞6.4级地震发生后, 云南省地震局地震现场工作队第一时间赶赴灾区开展应急工作, 将无人机倾斜摄影技术应用于地震现场震害调查工作中, 迅速有效地获取了地震后建筑物的破坏状态, 为地震烈度评估及震害分析提供了真实精确的第一手资料。通过对获取的几个破坏较重的区域遥感影像数据处理及目视解译, 发现位于漾濞县苍山西镇花椒园村背阴坡小组的一户土木结构民房破坏十分严重, 而在以往云南地区同级别地震中从未发现类似破坏现象。在地形地貌及场地条件复杂的云南地区, 历次地震中都会出现一些破坏异常的点或区域。分析其破坏原因, 对于当地或类似情况的点或区域的恢复重建选址、抗震设防规划以及地震灾害风险普查具有重要意义。因此, 本文利用无人机倾斜摄影获

\* 收稿日期: 2021-06-09.

基金项目: 国家重点研发计划“地震应急全时程灾情汇聚与决策服务技术研究(2018YFC1504505)”资助。

第一作者简介: 张方浩(1988-), 高级工程师, 主要从事地震灾害风险研究工作. E-mail: zfh125@sina.com.

取得的低空遥感影像对这户毁坏的土木结构民房的破坏情况及原因进行分析。

1 研究区概况

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分, 在云南省大理州漾濞县 (99. 87°E, 25. 67°N) 发生 6. 4 级地震, 震源深度 8 km。根据云南省地震局 (2021) 发布的《云南漾濞  $M_s$ 6. 4 地震烈度图》, 地震最高烈度为Ⅷ度, Ⅵ度区及以上总面积约 6 600 km<sup>2</sup> (含洱海), 等震线长轴呈 NNW 走向, 极震区位于苍山西镇, Ⅷ度区分布在苍山西镇、漾江镇、太平乡境内。本次地震造成 3 人死亡, 34 人受伤, 直接经济损失 32. 7 亿元。灾区各乡镇房屋遭受不同程度破坏, 框架房屋少数墙柱、墙梁结合部位开裂, 砖混房屋部分墙体、墙柱和墙梁结合部位开裂, 土木房屋少数墙体倒塌, 部分局部倒塌, 多数开裂、墙体外闪, 普遍梭掉瓦。漾濞县苍山西镇花椒园村背阴坡小组位于位于Ⅷ度区内, 有户籍人口 87 人, 民房 23 处, 其中土木结构 8 户、砖木结构 13 户、砖混结构 2 户。经现场核查本次地震造成背阴坡小组民房轻微破坏 15 户、中等破坏 7 户、毁坏 1 户。

2 数据与方法

2.1 技术流程

本文基于无人机低空倾斜摄影技术调查分析漾濞地震中的典型震害及原因, 具体技术流程如图 1 所示。首先利用作业效率较高的多镜头倾斜摄影无人机对破坏较重的区域进行航拍, 获取不同角度的航拍影像图, 再利用软件进行快速拼接处理和三维建模, 形成数字正射影像图、数字地表模型和三维地表模型, 最后通过计算机软件和目视解译发现破

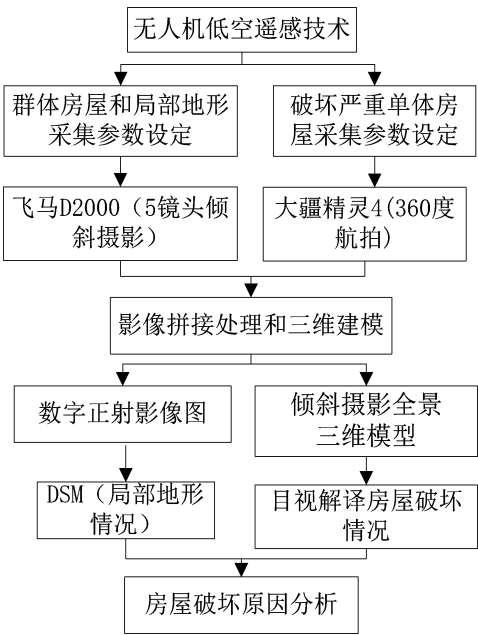


图 1 震害调查分析技术流程

Fig. 1 Technical process of earthquake – damage survey and analysis

坏特别严重的某户民房, 利用灵活轻便的微型旋翼无人机对该户民房进行 360 度航拍, 建立三维全景模型, 分析破坏的详细情况和不利因素。

2.2 影像数据及方法

采用飞马 D2000 无人机和 D – OP3000 倾斜摄影模块 (五镜头) 对整个背阴坡小组进行航拍, 无人机性能基本参数和采集过程及产品参数见表 1。将获取的无人机遥感数据利用飞马无人机管家软件构建背阴坡小组的倾斜摄影三维模型。图 2 能够展现村庄整体破坏情况和建筑物所在位置局部地形地貌情况。通过目视解译发现背阴坡小组民居破坏整体较重, 主要震害现象是屋顶局部梭瓦、屋檐瓦或砖闪落、房屋围挡墙体开裂或局部倒塌, 尤其是山墙顶部倒塌严重; 其中一户土木结构房屋柱子折断、墙体倒塌, 达到毁坏等级。

表 1 无人机性能基本参数和采集过程及产品参数

Tab. 1 Basic parameters of UAV performance, image acquisition process and product parameters

飞行器性能		技术参数	采集过程及产品	参数
总重量		2. 8 kg	航线规划范围	0. 8 km <sup>2</sup>
飞行升限		1 500 m	航拍照片数量	1 650 张
载重与续航时间		载重 200 g, 续航时间≥68 min	航线高度	320 m
悬停精度		垂直方向±1 m, 水平方向±2 m	航向重叠度	80%
巡航速度		≥8 m/s	旁向重叠图	65%
相机数量和像素		5 个, 2 430 万像素	成像总面积	2 km <sup>2</sup>
传感器尺寸		23. 5 mm x15. 6mm	三维模型空间分辨率	5 cm

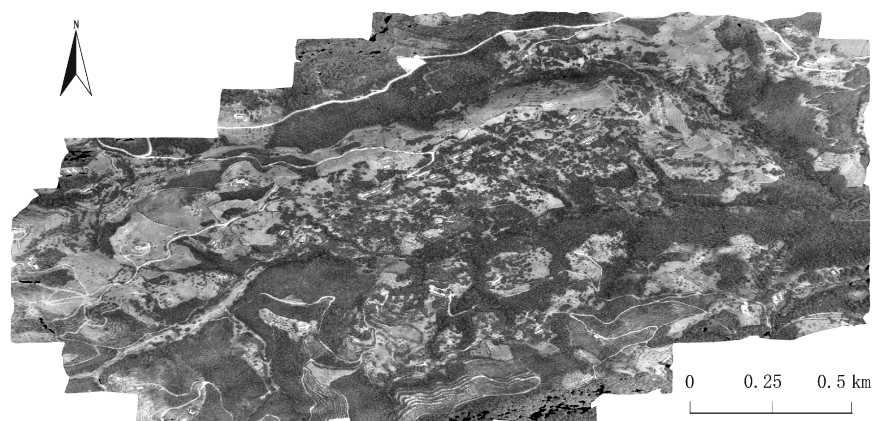


图2 背阴坡小组震后民房倾斜摄影三维模型

Fig. 2 3D model of the tilted image of houses of the Beiyinpo villagers' group

针对这户毁坏的民房，现场采用大疆精灵4无人机，航拍高度80 m，拍摄了69张倾斜摄影照片，构建民房的倾斜摄影三维模型，该模型能够呈现建筑物立体视觉效果，直观了解建筑物结构、墙体等详细破坏信息（和仕芳等，2016）。由图3

可知该户民房由居住房、储物房、畜圈房和洗漱房4种功能用房组成，其房屋结构类型不一，居住房 and 储物房是土木结构，畜圈房是墙抬梁，洗漱房是无圈梁构造柱砖混结构。

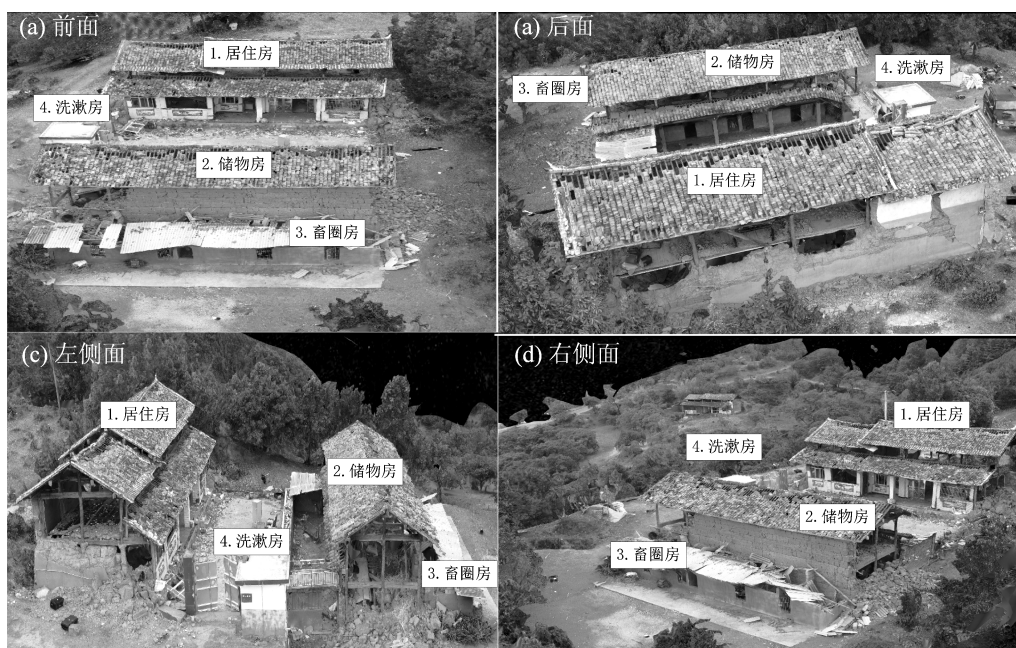


图3 背阴坡小组某户民房的倾斜摄影三维模型

Fig. 3 3D model of the tilted image of houses of a family in the Beiyinpo villagers' group

### 3 结果分析

#### 3.1 具体破坏情况

该民房顶部大面积梭瓦，人字形屋顶的顶部位置梭瓦最严重，几乎全部脱落，房屋四面

墙体不同程度倒塌或开裂，各功能用房具体破坏情况如下：

居住房是1995年建造的土木结构房屋（图4），两侧山墙和后墙是就地取材的夯土墙，在地震中两侧山墙和后墙的上半部分倒塌。前面墙体是砖墙，门窗较大，墙体相对较少，仅在门窗的

两侧和下方有堆砌的砖墙。地震中由于砖墙与柱子和门窗震动不一致,导致砖墙体与柱子和门窗相分离,出现砖墙与柱子间的竖向裂缝以及与门窗之间的水平裂缝,铝合金窗体周围裂缝明显较大。门窗出现变形,铝合金窗体出现整体脱落或外凸的现象,室内大量家具和家电倒塌或掉落在地面上。在地震中居住房木架构受损严重,整体

向右倾斜,左侧第一间的两根木柱断裂,2根辅助支撑立柱脱卯(图5);左侧第二间有2根木柱断裂,4根横梁脱卯(图6)。其他房间柱子均有不同程度向右倾斜、弯曲、移位的现象,中间和顶部横梁有不同程度脱卯现象。对照《中国地震烈度表》(GB/T 17742—2020)土木结构房屋破坏现象表述,居住房达到了毁坏等级。



图4 居住房墙体破坏情况  
Fig. 4 Main house's wall collapse



图5 居住房左侧第一间柱和梁破坏情况  
Fig. 5 Damage to the pillars and beams of the 1st room on the left of the Main house

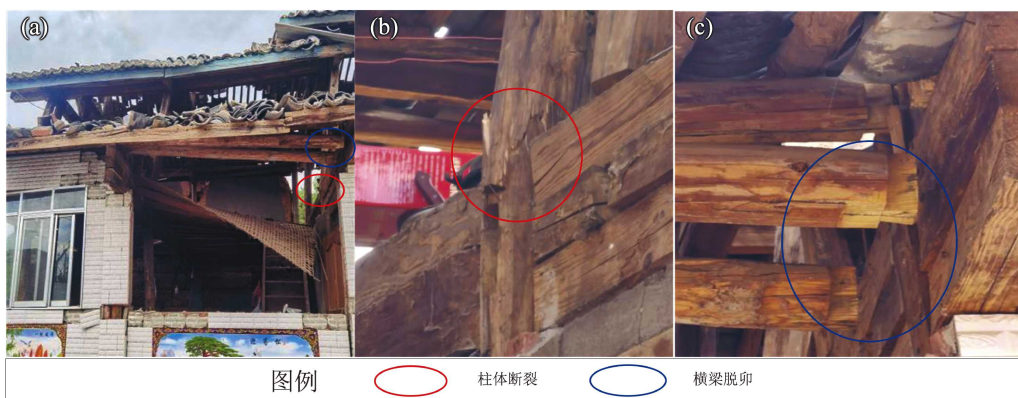


图6 居住房左侧第二间柱和梁破坏情况  
Fig. 6 Damage to the pillars and beams of the 2nd room on the left of the Main house



储物房是2007年建造的土木结构房屋（图7），地震后房顶大面积梭瓦，两侧夯土山墙倒塌，木结构整体向右轻微倾斜，未出现主要支撑立柱断裂的现象，但左侧第一间出现辅助支撑立柱榫子断裂、横梁垮塌的现象。

畜圈房是2020年建造的空心砖墙抬梁结构（图8a），这种结构抗震能力特别差，在地震中已

彻底毁坏，墙体严重倒塌，引起上方横抬梁掉落，钉在横梁上的石棉瓦也随之掉落毁坏。

洗漱房是2021年建造的无圈梁构造柱砌体结构（图8b），四周是砖墙，顶上浇筑了一层钢筋混凝土，门窗一侧靠近大门钢筋混凝土立柱，地震中由于砖墙与大门立柱震动不一致导致墙体与立柱之间形成较大位移的错裂，门窗变形损坏。

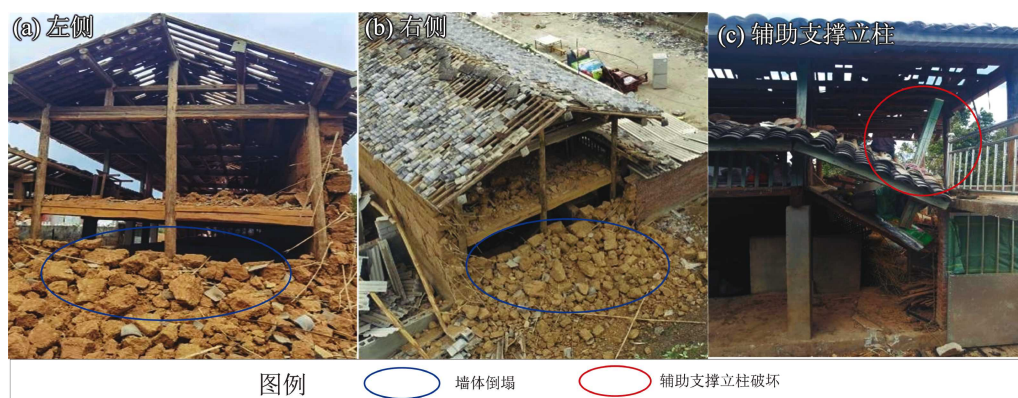


图7 储物房破坏情况

Fig. 7 Damage to the storeroom



图8 畜圈房（a）和洗漱房（b）破坏情况

Fig. 8 Damage to the cattle enclosure (a) and laundry room (b)

### 3.2 破坏原因分析

由于云南地区复杂的地形地貌及场地条件，不同区域农村民居建筑具有显著的差异性，各类建筑结构抗震能力参差不齐（明小娜等，2017），在历次地震中都会出现一些破坏异常的点或区域。造成这种现象的主要原因是大震的近断层破坏（李小军等，2008）、局部地形或场地条件影响（包括山体放大效应、边坡效应、软土效应等）（王兰民，吴志坚，2013；张建国等，2012）、房

屋的抗震性能（包括建筑结构、材料、设计等存在缺陷）（张彦琪等，2017；卢永坤等，2019）以及震害累加（施伟华等，2011）等因素。造成局部震害加重可能是某一个因素的主导，或者是某几个因素相互耦合的结果（迟明杰等，2014）。根据现场调查的情况，背阴坡小组某户民房地震后发生严重破坏的原因是多方面的，主要可能是由以下几个因素造成。

一是山体放大效应。在山区地貌条件下，震

害的差异远大于平原区,地形高差和局部地貌条件(高山山梁及孤突山梁)对地震动的放大效应明显,直接影响到地震灾害程度的分布(孙崇绍等,2011)。背阴坡小组的民房都是依山而建,这是造成震害严重的重要原因,现场调查发现相对严重的民房震害与当地的场地条件有明显的对应关系。图9为背阴坡小组毁坏民房(民房A)与相同建盖时间、相同结构土木房屋(民房B和民房C)在倾斜摄影三维影像图中的位置,可以看出民房A位于山体上部的山脊,海拔高度2437 m,民房B位于同一山体相近海拔高度的山洼,海拔高度2438 m,民房C位于同一山体

中部的山脊,海拔高度2334 m,图10为民房B和民房C的破坏。从不同海拔高度的相同结构的土木农居破坏程度可以看出,山体中部农居(民房C)房顶梭瓦,墙体轻微脱落而无倒塌,结构完好;山体上部的农居(民房A)墙体大量倒塌,结构受损严重。从相同海拔高度的相同结构的土木农居破坏程度可以看出,位于山洼的农居(民房B)房顶梭瓦,墙体局部倒塌,结构完好;而位于山脊的农居(民房A)毁坏。可见地震对房屋的影响呈现明显的沿山体自下向上的震害加重的趋势,山脊的震害明显重于山洼,表现出较明显的山体放大效应。

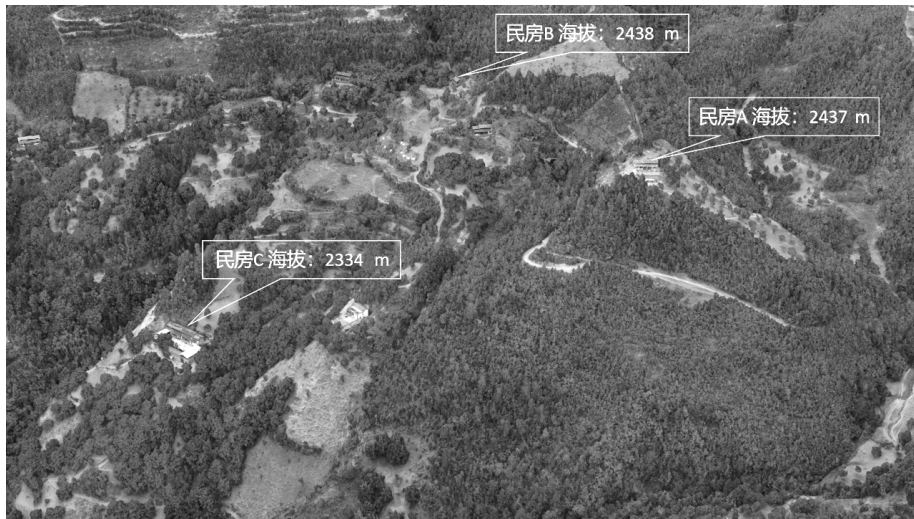


图9 背阴坡小组三户相同结构民房位置图(倾斜摄影航拍建模)

Fig. 9 three families' houses in the Beiyinpo villagers' group having the same structure (modeling according to tilted photography)

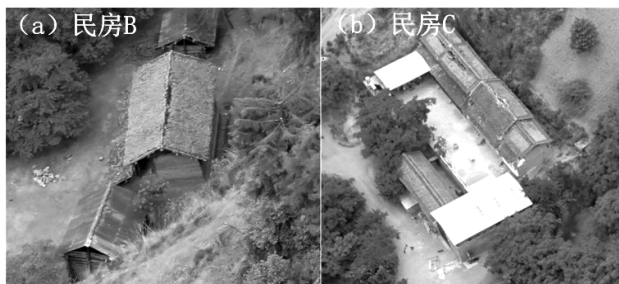


图10 背阴坡小组相同结构民房破坏情况

Fig. 10 Damage to the same-structure houses in the Beiyinpo villagers' group

二是边坡的放大效应。从无人机影像产出的数字地表模型(DSM)上看(图11),毁坏民房位于一个突出山梁的前缘顶部,其三面都是边坡,

几乎凌空。为查看民房所在地三面坡体的坡度值,基于30 m×30 m网格DEM数据,将其转换格网内坡度值(图12)。国际地理学联合会地貌调查与地貌制图委员会关于地貌详图应用的坡地分类为:0°≤坡度≤0.5°为平原,0.5°<坡度≤2°为微斜坡,2°<坡度≤5°为缓斜坡,5°<坡度≤15°为斜坡,15°<坡度≤35°为陡坡,35°<坡度≤55°为峭坡,55°<坡度≤90°为垂直壁(曹彦波等,2014)。民房A所在的突出山体前面边坡的坡度值为15°~42°,属于陡坡和峭坡;左面边坡的坡度值为18°~38°,属于陡坡和峭坡;右面边坡的坡度值为7°~16°,属于斜坡和陡坡。位于山体前缘突脊的土木房屋倒塌(民房A),而在山体后部凹地的相同类型的房屋则局部倒塌(民房B)。从民房A三面

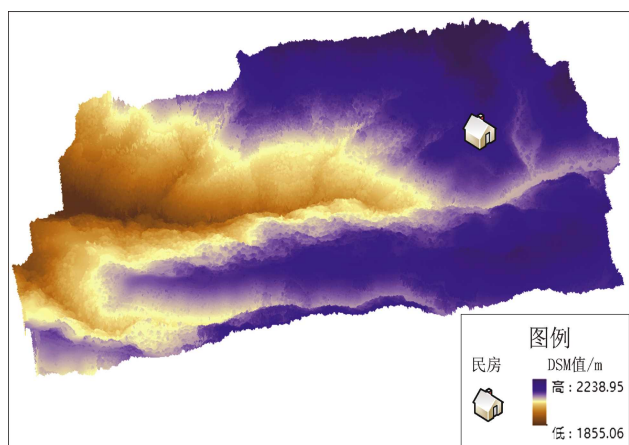


图11 背阴坡数字地表模型 (DSM)

Fig. 11 Digital surface modeling (DSM) of the Beiyinpo villagers' group

边坡都属于斜坡、陡坡和峭坡结合山体前缘和中后部位置相同结构房屋破坏的迥异现象来看,边坡效应导致的房屋震害加重现象显著。

三是震害叠加效应。震害叠加效应在多次地震中都存在,本次地震中灾区在1 h左右时间内经历4次5级以上地震影响。从图13可知背阴坡小组毁坏民居(民房A: 99.882 9°E, 25.676 6°N)位于 $M_s6.4$ 地震震中(苍山西镇秀岭村)东北方向1.5 km、5.6级地震震中(苍山西镇秀岭村)西北方向6.4 km、5.2级地震震中(苍山西镇秀岭村)西北方向12.8 km、5.0级地震震中(苍山西镇秀岭村)西北方向1 km处。背阴坡小组与4次5.0级以上地震震中相距较近,造成了农居震害叠加,加重了灾情,但由于几次地震时间间隔短,较难获得现场的房屋破坏对比资料。

四是墙体的抗震能力弱。调查中发现,背阴坡小组的土木结构房屋墙体都是就地取材的夯土墙,制作夯土墙的土黏粒含量较低,砂石粗粒成份较高,降低了墙体黏结性,而且在建造过程中未加入茅草或稻草增强其黏性。在地震作用下夯土墙容易发生脆性破坏,抗剪、抗拉强度很低,导致墙体大面积垮塌。在建筑工艺上,夯筑时所用模板的不规则极易致使墙体中间缝隙过大,加之每层夯土的厚度很难保证适度合理,这些问题对夯土墙的质量也会产生影响(王兰民,吴志坚,2013)。

## 4 结论与建议

本文利用多旋翼无人机采用倾斜摄影的方式

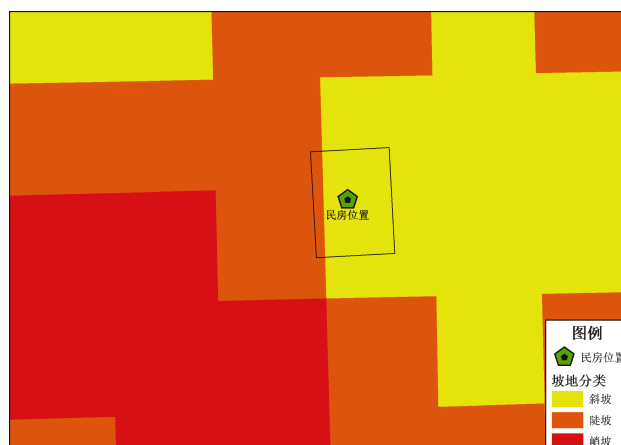


图12 背阴坡小组某户民房周围局部坡地类型

Fig. 12 Slope type of a site of a family's house and its vicinity in the Beiyinpo villagers' group

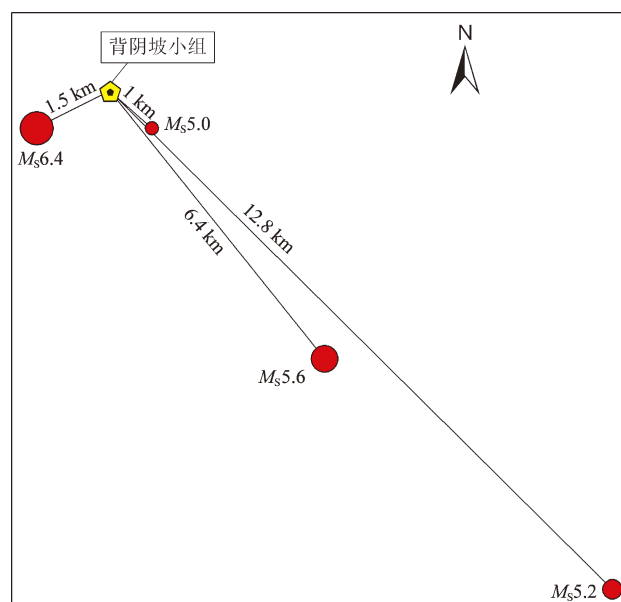


图13 背阴坡小组与震中相对位置

Fig. 13 Relative positions of the Beiyinpo villagers' group to the Yangbi main earthquake and other three aftershocks

拍摄了背阴坡小组建筑物多个角度影像,建模生成了高分辨率三维模型,并对破坏最严重的某户民居的破坏情况和原因进行了分析,得到以下结论和建议:

(1) 倾斜摄影建立的高分辨率三维模型,能够呈现建筑物立体视觉效果,直观了解建筑物丰富的细节层次和侧面纹理信息,弥补了以往传统遥感影像只能获取建筑物顶部信息的局限,便于对建筑物结构、墙体、门窗等详细破坏情况进行

分析。此外,大范围的倾斜摄影建模能够展现建筑物所在位置局部地形地貌情况,以便对于破坏异常的点或区域,从场地条件方面分析其破坏原因。

(2) 极震区背阴坡小组某户民房的破坏异常的不利因素包括山体的放大效应、边坡的放大效应、多次地震震害叠加效应、建筑墙体自身缺陷。至于是多个因素综合作用,或某个因素主导,甚至另有原因,还有待进一步深入研究分析。

(3) 重灾区漾濞县农居中土木和砖木结构房屋所占比例极高,接近 70%。发生在云南地区的历次地震和此次地震均证明,土木结构房屋在Ⅵ度区即会发生墙体开裂或梭瓦等中等破坏,在更高烈度区会发生局部或整体倒塌,其墙体建造工艺粗糙、黏结性不强、抗震性能差、防雨能力弱。针对土木结构房屋的这一特点,在灾后恢复重建中不宜再建设土木结构农居,而应建设砖混或砖木结构房屋。

(4) 由于重灾区漾濞县地域地处滇西北横断山高山峡谷区,境内山高谷深、山河相间,山地面积占比高达 98.4%、河谷台阶平地占比仅 1.6%,可供农民建房的地点极其有限,而本次地震中存在大量山体放大作用、边坡效应、局部地区有软土效应的现象。因此在重建农居选址时要尽量避免山顶或山腰等孤突地形、陡峭边坡前缘等位置或湖泊、沼泽周围等地基容易塌陷的区域,重视山体放大作用和边坡效应对农居的影响。在灾后恢复重建中要充分考虑灾区场地和震害特点,相关部门要为农居重建选址和基础处理提供科学意见和建议。

## 参考文献:

曹彦波,李永强,李敏,等. 2014. 基于多源数据的云南人口空间分布模拟研究[J]. 中国地震,30(1):118-131.  
陈文凯,何少林,张景发,等. 2008. 利用遥感技术提取震害信息方法的研究进展[J]. 西北地震学报,30(1):88-93.

迟明杰,李小军,陈波,等. 2014. 盈江“5·24”和“5·30”地震中吾排小学二层框架结构破坏分析[J]. 震灾防御技术,9(4):748-758.  
杜浩国,陈亮,林旭川,等. 2019. 云南红河县城区房屋地震灾害三维仿真模拟方法[J]. 地震研究,42(2):218-229.  
和仕芳,邓树荣,张方浩,等. 2016. 旋翼无人机在建筑物抗震能力调查中的应用[J]. 地震研究,39(4):673-679.  
荆帅军,帅向华,甄盟. 2019. 基于无人机倾斜影像的三维建筑物震害精细信息提取[J]. 地震学报,41(3):366-376.  
雷添杰,李长春,何孝莹. 2011. 无人机航空遥感系统在灾害应急救援中的应用[J]. 自然灾害学报,20(1):178-183.  
李小军,于爱勤,甘朋霞,等. 2008. 汶川 8.0 级地震北川县城区灾害调查与分析[J]. 震灾防御技术,3(4):352-362.  
林月冠. 2016. 倾斜摄影技术在灾后建筑物损毁评估中的应用分析[J]. 地理信息世界,23(1):108-114.  
卢永坤,周洋,代博洋,等. 2019. 2018 年云南墨江 5.9 级地震房屋震害特征与烈度评定[J]. 地震研究,42(2):172-178.  
明小娜,周洋,卢永坤,等. 2017. 滇西北地区房屋建筑特征和抗震能力评价[J]. 地震研究,40(4):646-654.  
施伟华,陈坤华,杨树明,等. 2011. 盈江 2011 年  $M_s5.8$  与 2008 年  $M_s5.9$  地震的震害差异及原因[J]. 地震研究,34(4):519-524.  
帅向华,刘钦,甄盟,等. 2018. 倾斜摄影技术在云南鲁甸地震现场的应用研究[J]. 震灾防御技术,13(1):158-167.  
孙崇绍,闵祥仪,周民都. 2011. 陇南山区局部地形对地震动强度的影响[J]. 西北地震学报,33(4):331-335.  
王兰民,吴志坚. 2013. 岷县漳县 6.6 级地震震害特征及其启示[J]. 地震工程学报,35(3):401-412.  
云南省地震局. 2021. 云南漾濞 6.4 级地震烈度图发布[EB/OL]. (2021-05-25)[2021-06-09]. [http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/\\_300559/\\_300651/629959/index.html](http://www.yndzj.gov.cn/yndzj/_300559/_300651/629959/index.html).  
张建国,周光全,崔建文,等. 2012. 宁洱  $M_s6.4$  地震考察研究综述[J]. 地震研究,35(1):151-155.  
张彦琪,陈维锋,卢永坤,等. 2017. 2014 年云南 3 次  $M>6$  地震灾害特征对比分析[J]. 地震研究,40(1):144-152.  
赵福军. 2010. 遥感影像震害信息提取技术研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.  
Galarreta J F, Kerle N, Gerke M. 2015. UAV - based urban structural damage assessment using object - based image analysis and semantic reasoning[J]. Nat Hazards Earth Syst Sci,15(6):1087-1101.  
GB/T 17742—2020,中国地震烈度表[S].



## Investigation of Typical Earthquake – damage Caused by the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake Based on the Oblique Photography

ZHANG Fanghao, DU Haoguo, ZHANG Yuanshuo, ZHANG Jianguo, LU Yongkun, CAO Yanbo  
(*Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

### Abstract

The high – resolution 3D model created on the basis of the oblique photography is able to present stereovision effect of buildings, which facilitates analyzing the damages of structures, walls, doors, windows, etc. The 3D model improves the traditional remote sensing images that can only obtain information of the roof of buildings. In the disastrous area in Yangbi County stricken by the 6.4 – magnitude earthquake on May 21, 2021, we used multi – rotor drones to take photos of the residential houses in Beiyinpo villagers' group in Huajiaoyuan Village, West Cangshan Town which located on the seismic Intensity 7 area. Further, we set up high – resolution 3D models, and on the basis of our models, we analyzed the cause of the most severely damaged residential houses of a family in the Beiyinpo villagers' group. Thus, we identified several unfavorable factors that caused the aggravation of the damage to the houses: the magnifying effect of mountains, the amplification effect of the slope, the superimposition of multiple earthquake damage, and the defects of the buildings' walls.

**Keywords:** earthquake – damage investigation; oblique photography; high resolution; the Yangbi 6.4 earthquake