

基于多源遥感影像的2021年云南漾濞 M_s 6.4 地震灾区建筑物信息识别与震害分析*

杜浩国¹, 张方浩^{1*}, 卢永坤¹, 林旭川², 邓树荣¹, 曹彦波¹

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:以无人机获取的震后区域高分辨率遥感影像、DSM 数字表面模型为基础, 提出多源遥感影像的建筑物震害精细化识别方法。对影像中的地物进行多尺度分割, 剔除其它地物, 提取出建筑物, 并依据光谱、纹理、形状特征进行震后建筑物震害、结构类型以及楼层数识别。将该方法应用于2021年云南漾濞 M_s 6.4地震灾区建筑物震害识别, 为灾害损失评估工作提供基础数据。结果表明, 与传统的人工震害调查相比, 基于多源遥感影像的建筑物信息识别方法速度快、准确率高。

关键词:漾濞 M_s 6.4地震; 建筑物震害识别; 灾害损失评估; DSM 数字表面模型; 高分辨率影像

中图分类号: P315.94

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)03-0490-09

0 引言

随着我国经济社会的飞速发展, 政府和公众对地震灾情获取的时效性要求越来越高(张建国, 2014; 张方浩等, 2020)。遥感技术作为地震灾情获取的重要手段之一, 在震后灾害损失评估工作中发挥着越来越重要的作用。多源遥感信息的建筑物震害识别, 能够对大面积区域的建筑物震害进行快速有效地识别, 为地震灾害风险评估提供精确有效的数据。

震后建筑物震害识别可大致分为现场调查、依托于各种机器学习算法的卫星遥感影像解译(王昶等, 2021; 李强, 张景发, 2016)和无人机遥感影像解译(和仕芳等, 2016; 杜浩国等, 2018)。现场调查方法如卢永坤等(2019)介绍了2018年云南墨江5.9级地震烈度分布情况, 给出了各烈度区的房屋建筑震害特征和各类结构房屋

的破坏比、震害指数, 并与中国地震烈度表进行了对比, 探讨了地震烈度评定的主要依据与方法。

基于机器学习算法的卫星遥感影像震害识别方法以震后卫星遥感影像为基础, 通过对影像中严重倒塌建筑物的纹理、亮度等特征进行震害识别, 但由于卫星影像的偏移、分辨率低等问题, 对建筑物屋顶轻微梭瓦和开裂等现象很难识别。陈晋等(2018)基于无人机、高分卫星影像资料, 通过实地调研与遥感影像对比分析, 建立了基于无人机、高分卫星遥感影像获取建筑物的技术路线, 并以甘肃省陇南市为研究区进行实例验证, 该方法采用无人机高分辨率影像弥补了高分卫星影像的偏移、分辨率低等不足, 能有效识别建筑物屋顶局部轻微梭瓦和开裂现象。

基于无人机高分辨率遥感影像的震害识别方法主要有2种: ①目视解译震害识别, 通过对影像中的建筑物进行人工震害等级划分, 避免了灾评人员开展实地调查所面临的风险, 但人工影像震

* 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)和云南省地震局“传帮带”项目(CQ3-2021001)联合资助。

第一作者简介: 杜浩国(1991-), 工程师, 主要从事地震应急救援、地震灾害损失评估研究。

E-mail: 1364125834@qq.com.

通讯作者简介: 张方浩(1988-), 高级工程师, 主要从事地震应急和地震灾害风险研究工作。

E-mail: zfh125@sina.com.

害识别会耗费大量时间，且需要短时间内处理大量建筑物震害信息，从而导致建筑物震害判别标准不统一。杜浩国等（2019）对云南省红河县城区房屋建造年代、结构类型、设防等级、楼层、层高、面积、外观形状及所处地形等进行实地调查，对红河县城区进行地震灾害三维仿真模拟评估，此类调查方法需要耗费大量的人力与时间，且人的主观性对评估结果影响很大。②基于机器学习算法的无人机高分辨率遥感影像震害识别。将无人机获取的高分辨率影像与机器学习算法相结合，既可以减少人工投入，震害识别的准确率又比较高，张雪华等（2019）通过使用点云CSF滤波算法得到研究区建筑物高度特征DSM数据，并通过点云格网化处理以及坡度值计算得到建筑物坡度特征，再结合研究区DOM数据进行建筑物震害提取。

本文在无人机高分辨率影像的基础上，提出基于多源遥感影像的建筑物信息识别方法，并应用于2021年5月21日漾濞M_s6.4地震灾害损失评估，对识别方法的精度与有效性进行了验证。

1 研究方法及技术路线

基于多源遥感影像的漾濞地震灾区建筑物震害精细化识别可分为4个步骤，如图1所示：①将无人机获取的单张航拍影像进行拼接，得到漾濞县淮安村高分辨率遥感影像与DSM数字表面模型（杜浩国等，2021）。②对影像进行多尺度分割，提取建筑物，去除非建筑物地表信息，并对建筑物进行边缘检测，识别出破坏区域。③训练样本与验证样本。训练建筑物震害识别规则，采用训练所得的规则对高分辨率影像进行建筑物震害、结构、楼层数识别分类。④精度检验。与目视解译、实地调研对比，分别计算分类结果的使用精度、生产精度和kappa系数。

1.1 多尺度影像震害分割

多尺度分割算法是一种自上而下的分割方法，其最小单元为一个单独的像素，合并周围相似像素从而形成小的影像对象，然后通过合并算法将光谱、纹理相同的小区域合并为更大的分割区域（杜妍开等，2020；代沁伶等，2020；马燕妮等，

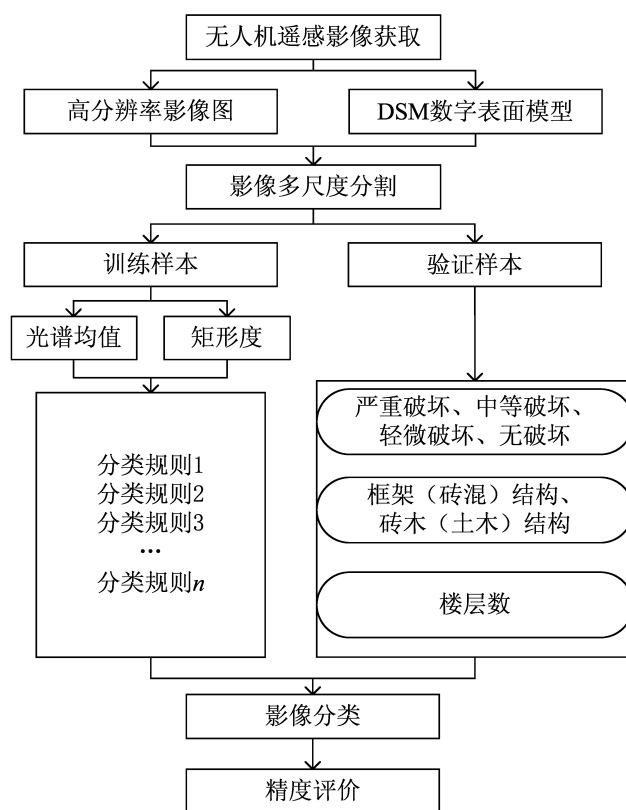


图1 基于多源遥感影像的建筑物震害精细化识别流程

Fig. 1 Flow chart of refined identification and analysis of buildings' damages by earthquakes based on multi-source, remote sensing images

2017)。通过对建筑物屋顶的破坏部分与整体部分的异质性进行分割，识别遭到破坏的建筑物。分割尺度的选择决定了震害识别的精度：如果分割尺度较小，则容易将无破坏的建筑物进行分割，识别为遭到破坏的建筑物；如果分割尺度较大，则容易将建筑物破坏的部分与整体融合，从而误判为无破坏建筑物。

影像的异质性 f 包含光谱异质性和形状异质性，其公式为：

$$f = \omega_1 x + (1 - \omega_1) y \quad (1)$$

式中： ω_1 为权值， $0 \leq \omega_1 \leq 1$ ； x 为光谱异质性， y 为形状异质性。其中 x ， y 分别为：

$$x = \sum_{i=1}^n p_i \sigma_i \quad (2)$$

$$y = \omega_2 u + (1 - \omega_2) v \quad (3)$$

式中: p_i 为第 i 影像层的权; σ_i 为第 i 影像对象层光谱值的标准差; u 为影像区域整体的紧密度; v 为影像区域边界的平滑度; ω_2 为权值, $0 \leq \omega_2 \leq 1$ 。

1.2 建筑物震害提取规则

由于遥感数据各波段为连续值 (0 ~ 255), 波段的区间过多, 会影响震害识别的效率和规则的质量, 因此, 在建立规则之前需要将训练数据集进行离散化, 即将各波段数据划分为有限的区间 (丁胜等, 2010), 如图 2 所示, 每条路径对应一条完整的识别规则。

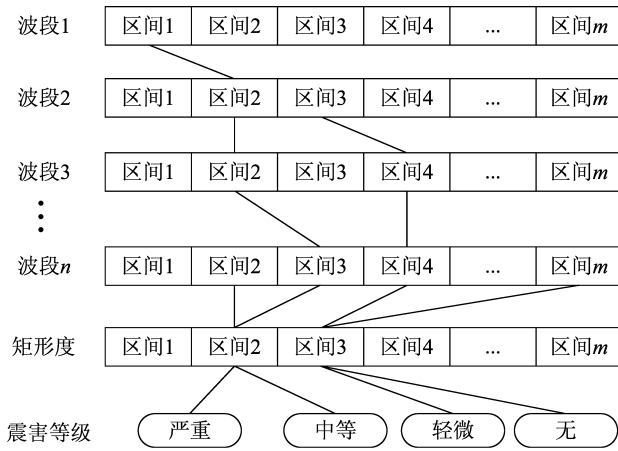


图 2 震害识别规则

Fig. 2 Identification rules of seismic damage

1.3 多源震害识别

遥感影像的建筑物震害、结构类型、楼层数等信息提取主要是依据影像对象的特征信息, 包含光谱、形状、纹理等多种特征, 通过分析光谱平均灰度值、面积、延伸性、矩形度、亮度等特征对影像进行分类 (曾涛等, 2010)。笔者选取平均灰度值、面积、矩形度作为建筑物震害识别指标。

光谱平均灰度值用来计算各影像对象组成的像元在各个波段上光谱的平均值, 计算公式如下:

$$\bar{A}_i = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n A_{x(i)} \quad (4)$$

式中: \bar{A}_i 为影像光谱平均灰度值; x 为波段号; $x(i)$ 为第 i 个像元在第 x 个波段的像元值, 范围大小为 (0, 255); n 为图像内像元的数目。

面积表示被分割区域的大小, 计算公式如下:

$$S(n) = \sum_{i=1}^n a_i \quad (5)$$

式中: $S(n)$ 表示在地理参考坐标系中, n 个像元 a_i 真实面积的总和。

矩形度为矩形形状的度量, 矩形的值为 1, 非矩形的值小于 1, $\text{Rect}(n)$ 表示第 i 个分割像元的矩形度值。计算公式如下:

$$\text{Rect}(n) = \sum_{i=1}^n \frac{S(i)}{R_{\max}(i) \cdot R_{\min}(i)} \quad (6)$$

1.4 精度分析

本文采用混淆矩阵、使用精度、生产精度、总体精度和 kappa 系数作为衡量震害识别精度的指标。

(1) 混淆矩阵

混淆矩阵主要用于比较分类结果和地表真实信息, 可以把分类结果的精度显示在一个混淆矩阵中。混淆矩阵将每一个真实像元的位置和分类与分类图像中的相应位置和分类相比较进行计算。混淆矩阵的每一列代表了一个地表真实分类, 每一列中的数值等于地表真实像元在分类图像中对应于相应类别的数量。

(2) 总体分类精度

总体分类精度等于被正确分类的像元数除以总像元数。地表真实图像或地表真实感兴趣区限定了像元的真实分类。被正确分类的像元沿着混淆矩阵的对角线分布, 它显示出被分类到正确地表真实分类中的像元数, 像元总数等于所有地表真实分类中的像元总和。

(3) kappa 系数

kappa 系数用于一致性检验和衡量分类精度。具体计算公式如下:

$$k = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (7)$$

$$P_e = \frac{a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + \cdots + a_c \cdot b_c}{n \cdot n} \quad (8)$$

式中: k 为分类精度指标 kappa 系数值; P_o 为总体分类精度, 由每一类正确分类的样本数量之和除以总样本数得到; a_1, a_2, \cdots, a_c 为每一类真实样本个数; b_1, b_2, \cdots, b_c 为每一类预测样本个数; n 表示真实总样本个数。表 1 为 kappa 系数精度级别分类标准。

表1 精度级别分类

Tab. 1 Classification of accuracy level

kappa 系数	精度级别
$0.0 \leq k < 0.20$	极低的一致性
$0.20 \leq k < 0.40$	一般的一致性
$0.40 \leq k < 0.60$	中等的一致性
$0.60 \leq k < 0.80$	高度的一致性
$0.80 \leq k < 1$	几乎完全一致

2 区域震害提取试验

2.1 研究区数据预处理

2021年5月21日21时48分34秒，云南省大

理州漾濞县发生 $M_s6.4$ 地震，震源深度8 km。地震造成漾濞县淮安村建筑物破坏较为严重，本文将其作为研究区，选取2021年5月23日15时获取的淮安村无人机高分辨率影像，选择影像波段为1~4波段，图3a为1~4波段合成的假彩色影像。辅助参考数据为该研究区域数字表面模型（DSM），如图3b所示。

训练样本是提高震害识别的关键，直接关系到建筑物震害识别规则的质量。根据实地调查分析，研究区建筑物震害可分为严重破坏、中等破坏、轻微破坏和无破坏4个等级，图4为部分训练样本。表2为不同震害等级选取的训练样本和验证样本数量。

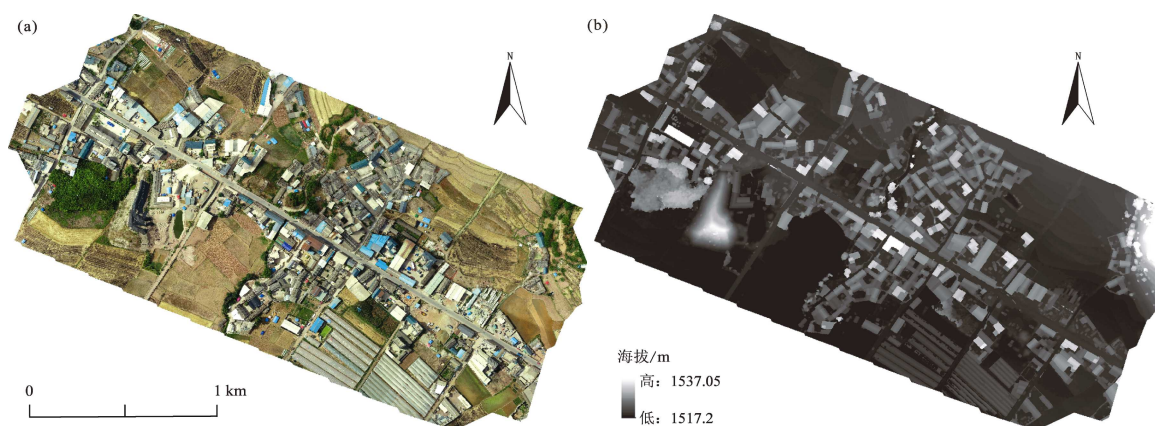


图3 淮安村高分辨率影像图 (a) 和数字表面模型 (b)

Fig. 3 High-resolution images (a) and digital surface model (b) of Huai'an village



图4 部分样本震害等级识别

Fig. 4 Identification of the degree of earthquake damage of some samples

表 2 训练样本和验证样本
Tab. 2 Training data and test data

序号	震害等级	训练样本像元数	验证样本像元数
1	严重破坏	68	78
2	中度破坏	88	92
3	轻度破坏	76	135
4	无破坏	50	84
合计		282	389

2.2 震害识别规则与试验结果

图 5a 为漾濞县淮安村不同震害等级样本。采用多尺度分割方法对影像中建筑物轮廓以及震

害区域进行边缘检测，如图 5b 所示，受损的建筑物屋顶具备不规则形状以及多形状聚集的特征；然后结合图像分割区域的平均灰度值、面积和矩形度进行建筑物震害提取，并得到 18 条震害识别规则，见表 3。图 5c 为部分训练样本震害规则提取结果。图 6 为 282 个训练样本平均灰度值与建筑物数量统计。将训练样本所得规则应用在试验区进行震害识别，得到识别结果，如图 7a 所示。图 7b 为目视解译与实地调研结果图，采用相同的识别方法得到淮安村建筑物结构类型统计结果（图 7c）与淮安村建筑物楼层数统计结果（图 7d）。

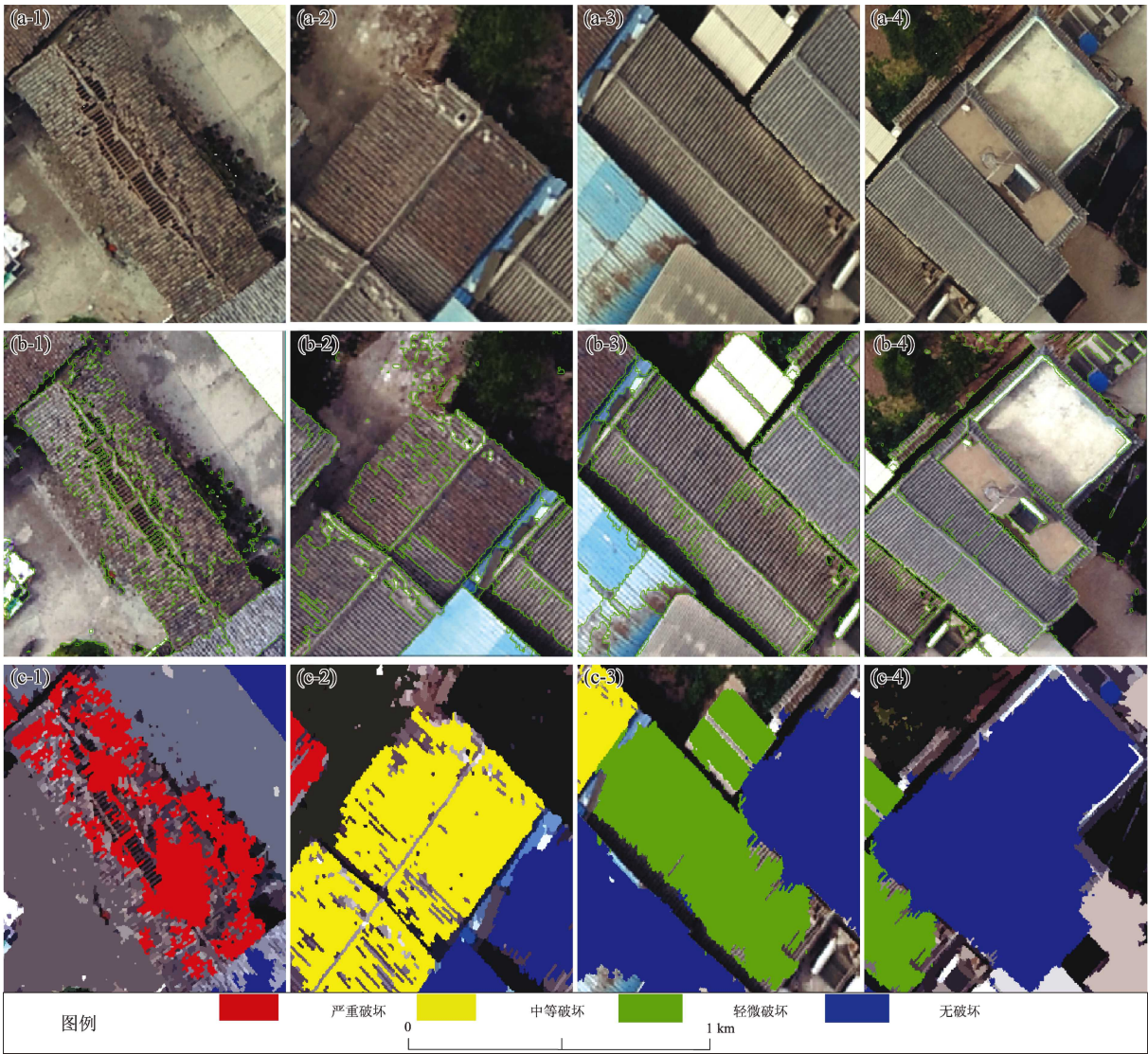


图 5 不同震害等级的建筑物样本 (a)、建筑物轮廓检测结果 (b) 和部分训练样本震害规则提取结果 (c)
Fig. 5 Sample of buildings with different damage levels (a), building contour test results (b),
extraction results of seismic damage rules from some training samples (c)

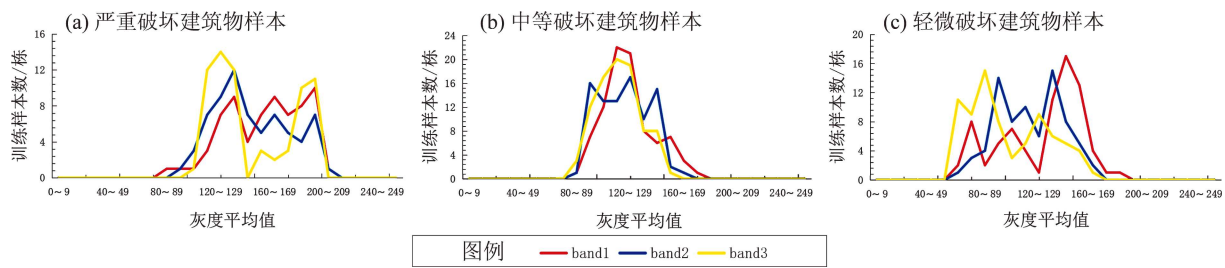


图 6 训练样本平均灰度值与建筑物数量统计

Fig. 6 Average grayscale value of training samples and statistics of buildings

表 3 部分震害识别规则

Tab. 3 Identification rules of seismic damage

序号	参数	结果
规则 1	if $190 < B_1 < 199$ and $120 < B_2 < 129$ and $130 < B_3 < 139$ and $0.35 < R < 0.45$	then 严重破坏
规则 2	if $120 < B_1 < 129$ and $110 < B_2 < 119$ and $100 < B_3 < 109$ and $0.45 < R < 0.65$	then 中等破坏
规则 3	if $140 < B_1 < 149$ and $130 < B_2 < 139$ and $80 < B_3 < 89$ and $0.75 < R < 0.85$	then 轻微破坏
.....
规则 17	if $130 < B_1 < 139$ and $100 < B_2 < 109$ and $90 < B_3 < 129$ and $0.55 < R < 0.75$	then 中等破坏
规则 18	if $190 < B_1 < 199$ and $120 < B_2 < 129$ and $180 < B_3 < 199$ and $0.25 < R < 0.45$	then 严重破坏

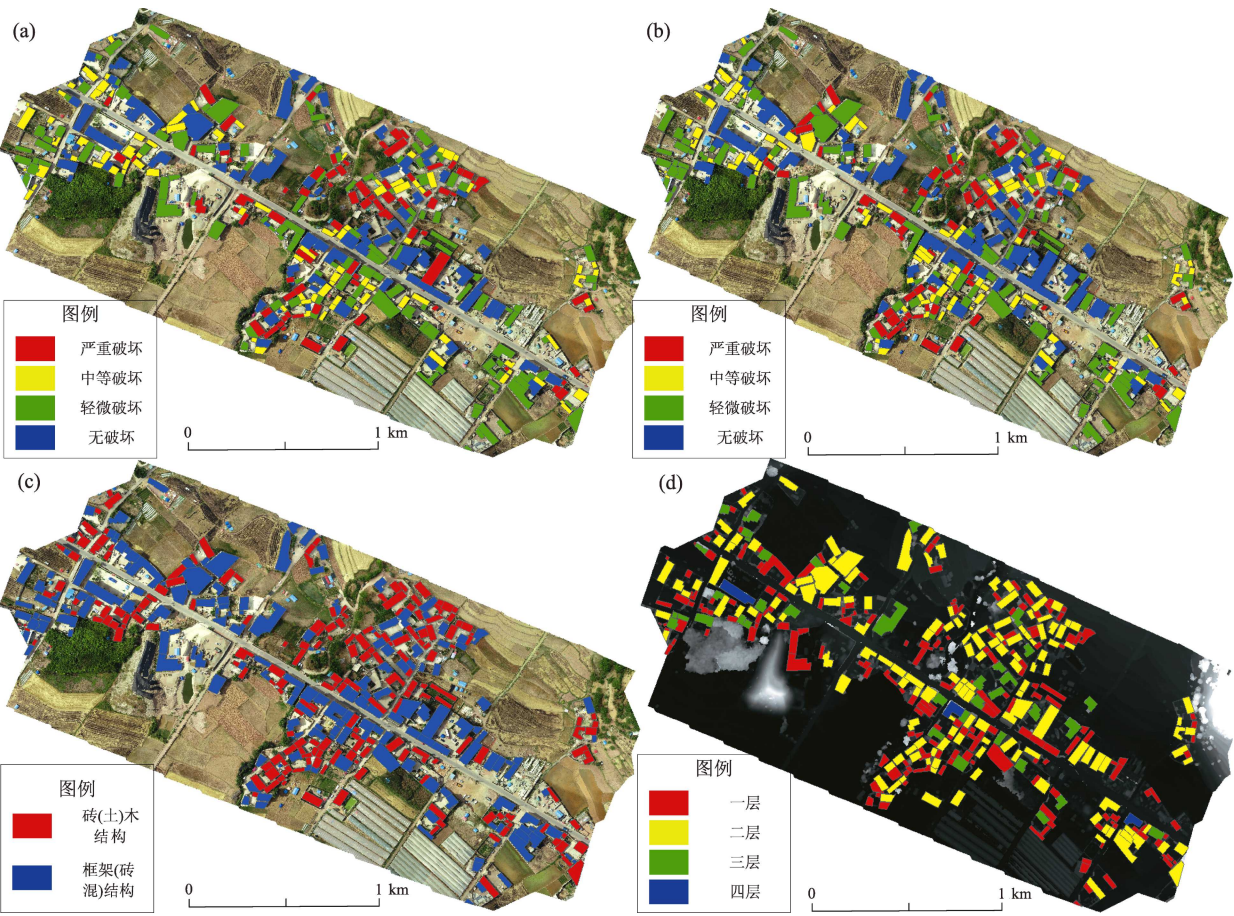


图 7 震害识别结果 (a)、目视解译与实地调查结果 (b)、建筑物结构类型识别结果 (c) 以及建筑物层高识别结果 (d)

Fig. 7 Earthquake damage identification results (a), visual interpretation and field investigation results (b), building structure identification result (c), and building height identification results (d)

3 讨论与分析

笔者采用实地调研与遥感影像目视解译的方法,对震害识别结果的精度进行评价,得到混淆矩阵(表4),从表4可以看出,淮安村建筑物震害识别总体精度为87.14%,kappa系数为0.8255,震害识别精度相对较好。表5为震害等级与建筑物结构类型统计结果。从表5可以看出,砖木和土木结构建筑物“严重破坏”数量为76栋,占“严重破坏”房屋总数的97.43%，“中等破坏”数量为73栋,占“中等破坏”建筑物总数的79.34%；对于框架和砖混结构建筑物,“无破坏”数量为80栋,占“无破坏”建筑物总数的95.23%，“轻微破坏”数量为83栋,占“轻微破坏”建筑物总数的61.48%。从表6中可以看出,楼层数为一层和二层的“严重破坏”建筑物数量为78栋,占“严重破坏”建筑物总数的100%，“中等破坏”数量为91栋,占“中等破坏”建筑物总数的98.8%；对于三层和四层建筑物,“无破坏”数量为36栋,占“无破坏”建筑物总数的42.85%，“轻微破坏”数量为6栋,占“轻微破坏”建筑物总数的4.44%。

综上所述,由于土木和砖木结构建筑物的抗震性能低于框架和砖混结构,因此顶部破裂倒塌数量占比较高,破坏程度较为严重。其中“无破坏”“轻微破坏”建筑物主要为新建的框架和砖混结构房屋,主要用砖块建造,多以3~4层为主。根据建筑物震害、结构与楼层数识别结果,这一类房屋建筑整体结构完整,外部轮廓清晰,没有出现明显的破损和倒塌现象,受到的地震破坏较小,部分建筑外墙有轻微破损,震害等级为基本完好。“严重破坏”建筑物主要以老旧的土木和砖木结构建筑物为主,1~2层居多,承重的载体为木头,墙面多以泥土砌成,结构简单且建造时间久远,屋顶呈现墨黑色。这一类建筑物受到的地震破坏较大,有大面积的屋顶和墙面倒塌,可以看到倒塌后的木结构框架以及泥土、瓦砾等堆积物。

表4 淮安村震害识别结果精度评价

Tab.4 Evaluation of accuracy of earthquake damage identification in Huai'an village

震害识别等级	严重	中等	轻微	无	总和	生产精度 (%)
	破坏/栋	破坏/栋	破坏/栋	破坏/栋		
严重破坏/栋	66	5	3	5	79	83.54
中等破坏/栋	6	78	5	4	93	83.87
轻微破坏/栋	3	6	123	3	135	91.11
无破坏/栋	3	3	4	72	82	87.80
总和	78	92	135	84	389	—
使用精度 (%)	84.61	84.78	91.11	85.71	—	—

表5 淮安村建筑物结构类型和震害统计

Tab.5 Statistics of earthquake damage of buildings in Huai'an village

建筑物结构类型识别结果	震害等级			
	严重破坏/栋	中等破坏/栋	轻微破坏/栋	无破坏/栋
框架和砖混结构	2	19	83	80
砖木和土木结构	76	73	52	4
总和	78	92	135	84
框架和砖混结构占比 (%)	2.56	20.65	61.48	95.23
砖木和土木结构占比 (%)	97.43	79.34	38.51	4.76

表6 淮安村建筑物楼层数震害统计

Tab.6 Statistics of earthquake damage of building storey in Huai'an village

建筑物楼层数识别结果	震害等级			
	严重破坏/栋	中等破坏/栋	轻微破坏/栋	无破坏/栋
一层	38	60	81	20
二层	40	31	48	28
三层	0	1	6	33
四层	0	0	0	3
总和	78	92	135	84
一层占比 (%)	48.717	65.21	60	23.80
二层占比 (%)	51.28	33.69	35.55	33.33
三层占比 (%)	0	1.08	4.44	39.28
四层占比 (%)	0	0	0	3.57

4 结论

本文提出基于多源遥感影像的建筑物震害精细化识别方法,应用于2021年5月21日漾濞6.4级地震的区域建筑震害识别工作,获取震后漾濞县淮安村无人机遥感影像,数字表面模型(DSM),并通过高分辨率影像的多尺度分割,剔除其它地物,提取建筑物,依据光谱、纹理、形状特征进行建筑物震害、结构类型与楼层数识别。

(1) 建筑物震害识别总体精度为87.14%, kappa系数为0.825 5。采用相同的识别方法,得到建筑物结构、楼层数识别精度分别为92.15%, 89.78%, kappa系数分别为0.8634, 0.842 3。分析结果表明,该方法能快速准确地对灾区建筑物进行震害识别,并能够得到详细准确的建筑物信息,其快速、精确等特点在灾情评估工作中发挥了重要作用,为灾后第一时间的震害快速评估提供了精确的数据。

(2) 通过识别结果可以看出,淮安村框架(砖混)结构与土木(砖木)结构建筑物相比,拥有良好的抗震性能,因此急需加强老旧土木和砖木建筑物的改造,提升建筑物抗震能力,减轻灾害风险。

参考文献:

陈晋,习聪望,陈文凯,等. 2018. 基于无人机、高分卫星遥感影像的甘肃省陇南市建筑物空间化研究[J]. 地震研究,41(2):192

-200.

代沁伶,罗斌,郑晨,等. 2020. 区域多尺度马尔可夫随机场的遥感影像分类[J]. 遥感学报,24(3):245-253.

丁胜,袁修孝,陈黎. 2010. 粒子群优化算法用于高光谱遥感影像分类的自动波段选择[J]. 测绘学报,39(3):257-263.

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.

杜浩国,林旭川,张方浩,等. 2021. 基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. 自然灾害学报,30(2):89-101.

杜浩国,张方浩,邓树荣,等. 2018. 震后极灾区无人机最优航拍区域选择[J]. 地震研究,41(2):209-215.

杜妍开,龚丽霞,李强,等. 2020. 基于最优分割的高分辨率遥感影像震害建筑物识别技术[J]. 地震学报,42(6):760-768.

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.

李强,张景发. 2016. 不同特征融合的震后损毁建筑物识别研究[J]. 地震研究,39(3):486-493.

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.

马燕妮,明冬萍,杨海平. 2017. 面向对象影像多尺度分割最大异质性参数估计[J]. 遥感学报,21(4):566-578.

王昶,张永生,纪松,等. 2021. 建筑物变化的多特征融和及随机多图综合检测法[J]. 测绘学报,50(2):235-247.

曾涛. 2010. 汶川地震重灾区多源影像处理及震害信息提取方法研究[D]. 成都:成都理工大学.

张方浩,卢永坤,邓树荣,等. 2020. 云南地区区域地震灾害特征[J]. 地震研究,43(1):134-143.

张建国. 2014. 地震烈度的评定及其意义[J]. 中国减灾,(17):42-43.

张雪华,王晓青,杜晓霞,等. 2019. 基于无人机遥感影像及其点云特征的建筑物震害提取[J]. 地震研究,42(2):230-235.

Recognition of the Earthquake Damage to Buildings in the 2021 Yangbi, Yunnan $M_s6.4$ Earthquake Area Based on Multi-source Remote Sensing Images

DU Haoguo¹, ZHANG Fanghao¹, LU Yongkun¹, LIN Xuchuan², DENG Shurong¹, CAO Yanbo¹

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, Heilongjiang, China*)

Abstract

Rapid identification of the earthquake damage to buildings in the earthquake – stricken area is of great significance for scientific and effective assessment of losses from earthquake disasters. Based on the high – resolution, remote – sensing images of post – earthquake field investigation obtained by UAV and digital surface model (DSM), we propose an identification method of earthquake damage to buildings based on multi – source, remote – sensing images. In the light of this method, we first do the multi – scale segmentation of the surface feature, then extract buildings' information, and weed out other features. Further, we identify the damage, structures and the floors of the buildings according to the spectrum, texture and shape of the buildings on the images. We apply our method to the identification of the damage to the buildings in the Yangbi $M_s6.4$ earthquake on 21th, May 2021. The results show that, compared with the traditional manual investigation of the damage in the earthquake – affected areas, our method is more effective and more accurate.

Keywords: the Yangbi $M_s6.4$ earthquake; identification of earthquake – damage to buildings; assessment on the disaster losses; digital surface model; high – resolution image