

李金香, 赵朔, 金花, 李亚芳, 郭寅. 2019. 结合纹理和形态学特征的高分遥感影像建筑物震害信息提取. 地震学报, 41(5): 658–670. doi: 10.11939/jass.20190014.

Li J X, Zhao S, Jin H, Li Y F, Guo Y. 2019. A method of combined texture features and morphology for building seismic damage information extraction based on GF remote sensing images. *Acta Seismologica Sinica*, 41(5): 658–670. doi: 10.11939/jass.20190014.

结合纹理和形态学特征的高分遥感影像 建筑物震害信息提取

李金香^{*} 赵 朔 金 花 李亚芳 郭 寅

(中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局)

摘要 为提高震害信息获取时效性, 对基于我国国产高分遥感影像的建筑物震害信息提取方法进行深入研究, 本文以 2017 年 5 月 11 日新疆塔县 $M_{\text{S}}5.5$ 地震为例, 利用该地震前后极灾区高分遥感影像, 利用结合纹理和形态学特征的方法进行了建筑物震害信息提取, 通过变化检测分析获取了极灾区建筑物震害信息, 并与基于像元级和基于目标级的信息提取结果进行对比, 采用震后无人机影像目视解译结果对本文结果进行了精度验证。结果表明: 通过缩减研究区范围可大力提高数据提取精度和速度; 运用灰度共生矩阵、二值化、数学形态学等方法对影像进行迭代运算, 能较好地提取高分遥感影像中的建筑物信息; 通过对地震前后建筑物提取结果进行变化检测分析, 能够有效地提取完全倒塌的建筑物, 信息提取总体精度为 90.45%, 比基于像元级和基于目标级信息提取结果的精度分别提高了 5.78% 和 5.23%, 可为震后快速确定人员压埋点、部署救援力量提供决策依据, 提高地震应急救援的时效性。

关键词 纹理特征 形态学 高分遥感 建筑物 震害

doi: 10.11939/jass.20190014 中图分类号: P315.9 文献标识码: A

A method of combined texture features and morphology for building seismic damage information extraction based on GF remote sensing images

Li Jinxiang^{*} Zhao Shuo Jin Hua Li Yafang Guo Yin

(Earthquake Agency of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China)

Abstract: It is of great significance to study the methods in the extraction of building seismic damage information based on high-resolution remote sensing images in China, which can improve the timeliness of seismic damage information acquisition. Taking an earthquake with $M_{\text{S}}5.5$ occurred near Taxkorgan Tajik Autonomous County, Kashi Prefecture, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, on May 11, 2017, as an example, based on high-resolution remote sensing images before and after the earthquake, building information was extracted by the method of combined texture features and morphology. Building damage information in

收稿日期 2019-01-15 收到初稿, 2019-07-08 决定采用修改稿.

* 通信作者 e-mail: ljxhappy365@163.com



extremely disaster areas was extracted through change detection and analysis, and then compared with the results extracted by pixel-based and object-based methods. Finally, the accuracy was verified by visual interpretation results of unmanned aerial vehicle images after the earthquake. The results show that the accuracy and speed of data extraction can be greatly improved by reducing the scope of the studied area. Using gray level co-occurrence matrix, binarization, mathematical morphology and other methods we can extract building information from GF remote sensing images more effectively. Through the change detection and analysis of building extraction results before and after the earthquake, completely collapsed buildings can be effectively extracted. The overall accuracy of information extraction is 90.45%, which is 5.78% and 5.23% higher than that of pixel-based and object-based information extraction, respectively. The completely collapsed buildings information can provide decision-making basis for rapid determination of people buried places and deployment of rescue forces after earthquakes, and improve the timeliness of earthquake emergency rescue.

Key words: texture features; morphology; GF satellite remote sensing; building; seismic damage

引言

破坏性地震发生后，主要通过现场调查获取震害信息，这样获取的信息的精度和置信度均较高，然而破坏性地震的影响范围往往很大，现场调查存在工作量大、效率低、信息表达不直观等问题(柳稼航等, 2004; 张志强等, 2018)。鉴于遥感影像覆盖面积大、成本低，具有快速、宏观的特点，因此可作为获取震害信息的一种既经济又快捷的数据来源(王晓青等, 2003; Huang *et al.*, 2014)。经由高分辨率遥感影像提取的建筑物震害信息可为地震现场救援决策提供高效的数据支持(Turker, Cetinkaya, 2005; 王龙等, 2007)。“十二五”计划以来，我国陆续研制发射并投入使用了“高分一号”(GF-1)、“高分二号”(GF-2)和“高分四号”(GF-4)卫星，极大地满足了我国对中高分辨率遥感数据的应用需求。随着国产卫星技术的发展，国产卫星产出的数据质量高、获取简单且成本较低，为防震减灾事业发展提供了强有力的支持。因此研究基于我国国产高分数据的建筑物震害信息提取方法，对提高震害信息获取速度和救援决策效率意义重大。

近年来，研究人员依据建筑物震害特征，提出了多种建筑物震害信息提取方法(Turker, Sumer, 2008; Dong, Shan, 2013; 叶昕等, 2016)，例如：Yamazaki 等(2005)采用目视解译方法进行建筑物震害信息提取；翟永梅等(2015)和赵妍等(2016)采用面向对象方法进行基于高分辨率遥感影像的建筑物震害信息提取；张景发等(2002, 2017)就建筑物震害评估和多源遥感特征及机理予以分析；王晓青等(2015)借助遥感手段针对尼泊尔 $M_{S}8.1$ 地震的建筑物震害信息进行提取和分析。基于遥感影像的建筑物震害信息提取已有诸多成果，也具有很好的应用前景，然而由于该技术的复杂性，使其在现实中的应用受到局限，特别是信息提取的速率、精度及自动化程度等方面亟待提高。

为此，本文拟以分辨率高、获取方便的国内高分卫星遥感影像为基础，考虑人机互补的优势，结合建筑物纹理和形态学特征，研究适用于我国高分卫星数据的建筑物震害信息提取方法，为地震应急决策、灾害损失评估及震后灾区恢复重建等工作服务。

1 研究区域概况

塔什库尔干塔吉克自治县，简称塔县，隶属新疆维吾尔自治区喀什地区。塔县位于帕米尔高原西部，西昆仑褶皱带的塔什库尔干隆起地带，海拔较高。塔县的地势由西南向东北倾斜，山脉自西南向东北延伸。

2017年5月11日5时58分(北京时间)，新疆喀什地区塔什库尔干塔吉克自治县(37.58°N , 75.25°E)发生 $M_{\text{S}}5.5$ 地震，震源深度为8 km。该地震造成塔什库尔干县8人遇难、31人受伤。8名遇难者均在塔什库尔干乡库孜滚村，受该地震影响，库孜滚村的建筑物大面积倒塌毁坏，此地为塔县地震的极灾区，正是本文的研究区域。

2 建筑物震害检测方法

本文采用地震前后同系列卫星遥感数据，首先完成两景影像精确位置匹配，然后结合纹理和形态学特征方法进行建筑物信息提取，满足一定的精度要求；通过震前、震后建筑物变化检测分析，提取研究区倒塌建筑物的空间分布信息。

2.1 技术路线

图1给出了建筑物震害信息提取的技术路线图，技术路线包括以下几部分：

1) 数据收集及预处理。收集研究区震前震后的高分遥感影像数据、数字高程模型(digital elevation model, 缩写为 DEM)数据、行政区划数据等，进行影像正射校正、几何校正、影像融合、影像重采样等预处理，完成震前、震后影像空间匹配；然后手动建立居住区为感兴趣区，缩小研究区范围。

2) 纹理分析。采用灰度共生矩阵方法提取建筑物纹理信息，通过对比分析，确定能够突出建筑物信息的纹理特征图像。

3) 二值化及形态学运算。对纹理特征图像进行密度分割，找到建筑物取值范围，进行二值化(林祥国, 张继贤, 2017)，从而提取建筑物的空间分布信息；之后通过形态学运算优化建筑物形态。

4) 精度评价。将通过人工识别的完整建筑物作为地面样本，计算信息提取的总分类精度，并且进行精度评价，人工修改误提、漏提的建筑物区域，使其达到精度要求，为建筑物

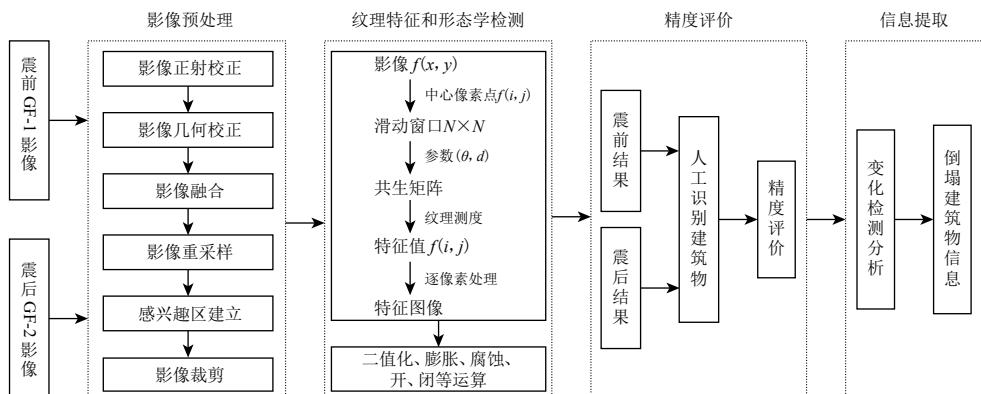


图1 建筑物震害信息提取的技术路线图

Fig. 1 Technology route line of seismic damage information extraction

震害信息提取提供精确数据支持。

5) 建筑物震害信息提取。对震前、震后提取的建筑物空间分布信息进行变化检测, 提取完全倒塌的建筑物空间分布信息。

2.2 数据收集

塔县地震发生后, 为快速了解灾区灾情, 新疆维吾尔自治区地震局应急遥感技术组联系新疆卫星遥感应用中心快速收集地震前后的高分遥感数据, 便于快速进行震害信息遥感解译。所获数据为研究区震前2015年9月6日GF-1影像、震后2017年5月13日GF-2影像以及研究区DEM、县驻地、乡驻地、县界、乡界等数据。

2.3 数据预处理

采用正射校正、几何校正、影像融合、影像重采样等方法对震前、震后遥感影像进行预处理, 其中正射校正采用30 m DEM数据进行, 几何校正以google影像为基础进行。为保证数据的解译效果, 本文还进行了影像融合。为保证建筑物震害信息的解译精度, 在数据预处理时对震前、震后影像进行几何精校正。由于震前、震后影像的空间分辨率不一致, 为保证匹配精度, 需将震前影像进行影像重采样, 重采样数据的空间分辨率为1 m, 然后进行几何精校正, 校正误差小于0.5个像元, 至此完成震前、震后的影像精确匹配。图2a和图2b分别为预处理后研究区的震前GF-1影像和震后GF-2影像。

为提高建筑物震害信息遥感解译精度和效率, 以居住区为目标, 手动建立感兴趣区, 裁剪研究区影像, 减少数据范围及干扰信息。图2c为经过感兴趣区裁剪后的震后GF-2遥感影像图。

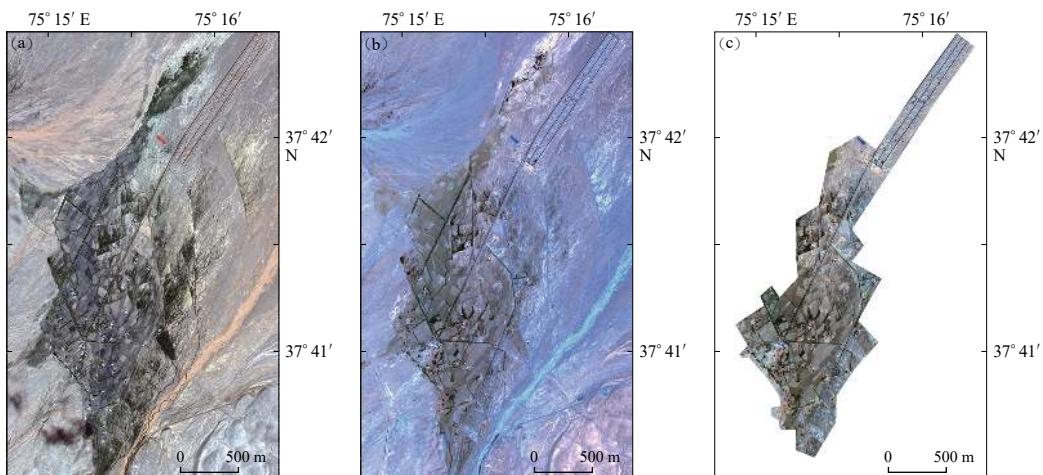


图2 研究区预处理后的GF卫星遥感影像图

(a) 预处理后的震前GF-1影像图; (b) 预处理后的震后GF-2影像图; (c) 裁剪震后的GF-2居住区影像图

Fig. 2 GF remote sensing images preprocessed in the studied area

(a) GF-1 image before earthquake after pre-processing; (b) GF-2 image after earthquake after pre-processing;

(c) Clip image of GF-2 residential area after the earthquake

2.4 纹理分析

倒塌建筑物和完好建筑物的纹理特征和结构不同: 完好建筑物形状规则, 房屋边缘纹理清晰; 倒塌建筑物的形状和布局发生变化, 影像中房屋建筑物破坏截面粗糙、破碎, 形状不

规则, 房屋边缘模糊等。通过提取纹理信息可自动提取建筑物, 通过震前、震后建筑物信息对比分析可识别研究区的倒塌建筑物。

灰度共生矩阵法是较为流行的纹理分析方法, 也是建筑物检测的最有效方法之一。灰度共生矩阵可以展现像素值在空间的相对位置。通过多种方法对灰度共生矩阵加权计算, 可以得到一系列特征统计量来表征区域纹理。Haralick (1979) 提出了 14 种特征统计量, 常用的有均值、方差、同质性、对比度、非相似性、熵、角二阶矩、相关性等。

2.5 数学形态学方法

灰度共生矩阵算法能较好地提取建筑物的空间分布信息, 但提取结果存在建筑物边缘不平滑、小斑块噪声以及建筑物顶面有孔洞等问题。采用数学形态学方法进行数据处理(王光霞, 杨培, 2000; 翟辉琴, 王明孝, 2005; 欧阳平, 张玉方, 2009; 李金香等, 2016), 可以得到完整的建筑物顶面信息。

数学形态学基本公式如下:

当二值形态腐蚀时,

$$A \ominus B = \{x : B + x \subset A\}; \quad (1)$$

当二值形态膨胀时,

$$A \oplus B = [A^c \ominus (-B)]^c; \quad (2)$$

当三值形态开运算时,

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B; \quad (3)$$

当二值形态闭运算时,

$$A \bullet B = (A \oplus B) \ominus B, \quad (4)$$

式中, A 为输入图像, B 为结构元素, x 为平移量, \subset 表示子集关系, A^c 表示 A 的补集。

3 试验结果及分析

为了更好地说明本文方法中建筑物震害信息提取的效果, 应用上述方法提取研究区建筑物震害信息后, 同时使用基于像元级和基于目标级信息提取方法提取建筑物震害信息, 并对不同方法所得计算结果进行比较。

3.1 结合纹理和形态学特征的建筑物震害信息提取

采用灰度共生矩阵法对新疆塔县地震极灾区震前、震后遥感影像进行纹理分析, 计算了 8 种特征图像, 结果如图 3 所示。通过对比, 采用干扰信息少的对比度特征来提取建筑物纹理信息。

灰度共生矩阵方法中的尺度、方向及步长所采用的数值不同, 计算结果不同, 本文采用 45° 方向、步长为 1 的参数进行运算。合适的滑动窗口尺度能够更好地展现建筑物信息, 本文选取 3×3, 5×5, 7×7, 9×9, 11×11, 13×13 窗口尺度进行计算, 图 4 为不同尺度的纹理特征影像。因震前、震后影像的分辨率不同, 建筑物纹理特征存在差异, 故而对震前、震后影像进行计算时, 在参数适用性上也有差异, 本文对于震前 GF-1 影像采用 9×9 窗口、45° 单一方向、步长为 1 的对比度纹理特征影像进行建筑物信息提取, 对于震后 GF-2 影像采用 7×7 窗口、45° 单一方向、步长为 1 的对比度纹理特征影像进行建筑物信息提取。

其次对提取的特征图像进行二值化, 确定建筑物的空间分布。因震前、震后影像的拍摄

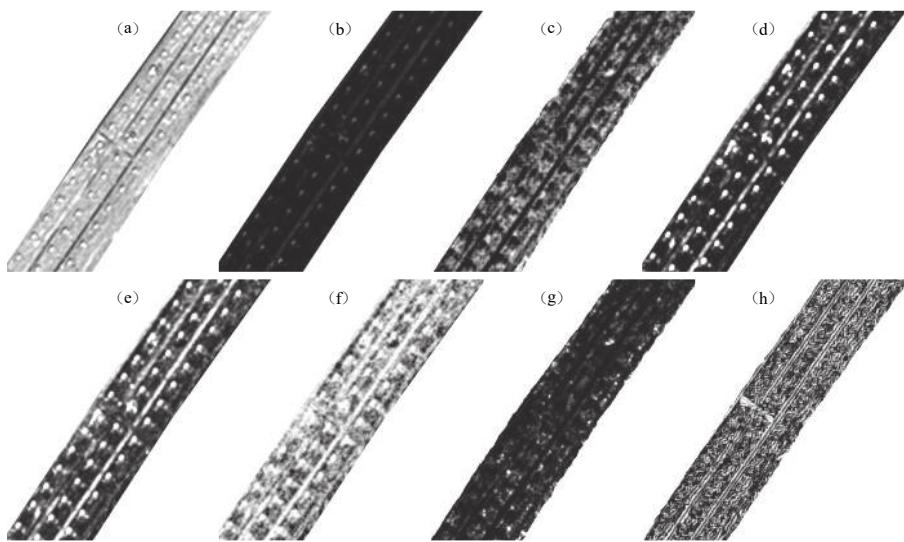


图 3 建筑物纹理特征图像

(a) 均值; (b) 方差; (c) 同质性; (d) 对比度; (e) 非相似性; (f) 熵; (g) 角二阶矩; (h) 相关性

Fig. 3 Texture feature of buildings

(a) Mean; (b) Variance; (c) Homogeneity; (d) Contrast; (e) Dissimilarity; (f) Entropy;
(g) Angular second moment; (h) Correlation

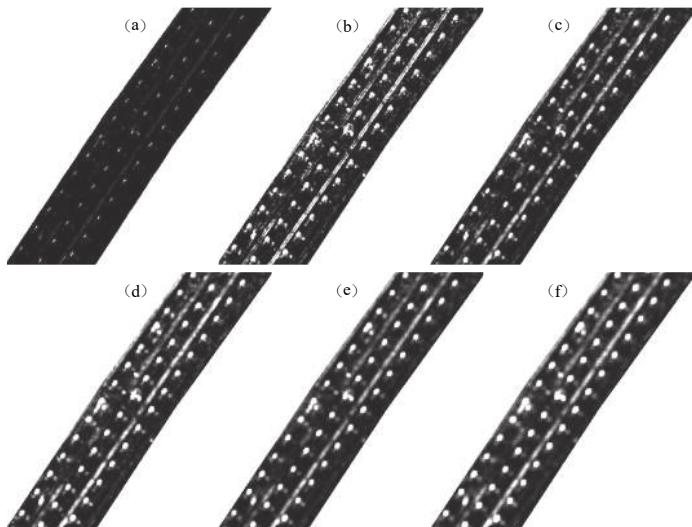


图 4 不同尺度的对比度特征图

Fig. 4 Contrast feature images with different scales

(a) 3×3 ; (b) 5×5 ; (c) 7×7 ; (d) 9×9 ; (e) 11×11 ; (f) 13×13 ;

时间不同,传感器也不同,故提取的特征图像中建筑物取值分布不同,采用密度分割法对特征图像进行密度分割,找到震前、震后影像中建筑物分布的纹理特征值,进行二值化,值为1的像元为建筑物数据(图 5a, b)。

数学形态学方法是指通过基于二值化影像开展的膨胀、腐蚀、开、闭等运算,使建筑物

边缘更加平滑。因震前、震后影像的分辨率不同，震前、震后建筑物的边缘纹理存在差异，故而在利用数学形态学方法进行数据处理时，震前、震后影像计算参数也不同(图 5c)。通过逐步试验，找到最优参数进行建筑物空间分布信息提取。图 6 给出了本文所提取的研究区震前、震后影像建筑物的空间分布信息。

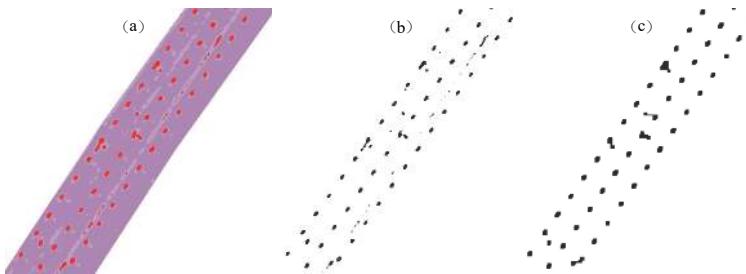


图 5 通过密度分割 (a)、二值化 (b)、形态学运算 (c) 的建筑物信息提取

Fig. 5 Building information extraction by density segmentation (a), binarization (b) and morphological operation (c)

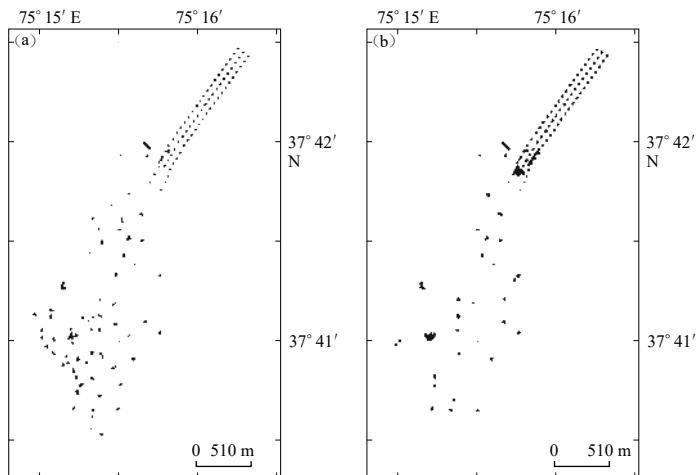


图 6 塔县地震前(a)、后(b)的建筑物提取结果图

Fig. 6 Extraction results of buildings before (a) and after (b) the Taxkorgan Tajik earthquake

精度评价(余先川等, 2012)是分析建筑物信息提取结果的精度，进而判断提取结果的优劣及是否可用。通过人工选取建筑物感兴趣区域作为地面样本，对建筑物信息提取结果进行精度评价，震前、震后建筑物震害信息提取总精度分别为 86.74% 和 77.78%。震害信息提取总精度较高，研究区无漏提现象，然而存在误提区域，震前、震后影像误提的区域主要为植被区，因植被纹理与房屋建筑物纹理存在相似的区域被误提，同时形态学综合过程中对建筑物边界进行膨胀腐蚀，使得房屋边界有所扩张，扩张区域误提了道路及空地区域。总之，利用本文算法提取的建筑物具有较高的正确率，后续通过人工修正方法对误提区域进行修正，保证后续建筑物震害信息提取的精度要求。

进而对震前、震后提取的建筑物进行变化检测分析，提取建筑物震害信息。因形态学方法在进行建筑物信息综合的过程中对建筑物的边界已经进行了膨胀、腐蚀等运算，本文提取

的建筑物边界较实际有所偏移,故而震前、震后建筑物边缘的匹配度欠佳,因此本文仅提取全部倒塌建筑物及新增完好建筑物的信息。

震害信息提取算法为:首先提取与震后建筑物提取结果有交集的震前建筑物的空间分布数据,即为震后未倒塌的建筑物;然后用震前建筑物的提取结果剔除震后未倒塌的建筑物,即为倒塌建筑物的空间分布数据。同理,提取与震前建筑物提取结果有交集的震后建筑物的空间分布数据,用震后建筑物提取结果剔除交集,即为2015年后新建且在震后未倒塌的建筑物的空间分布数据。具体建筑物震害信息提取结果如图7所示。

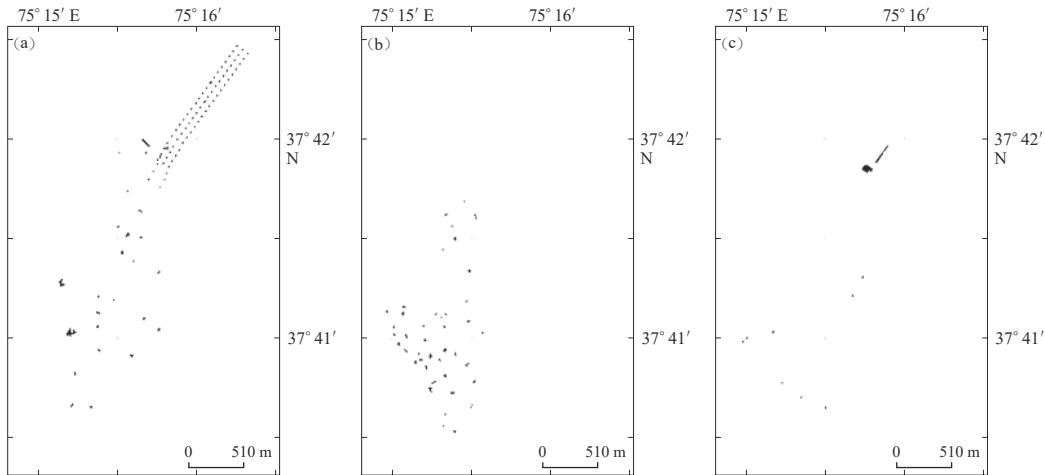


图7 塔县地震后极灾区建筑物震害提取结果图

(a) 未倒塌建筑物分布图; (b) 倒塌建筑物分布图; (c) 新建未倒塌建筑物分布图

Fig. 7 Damage extraction map of buildings in the extreme disaster areas of Taxkorgan Tajik earthquake

(a) Distribution of uncollapsed buildings; (b) Distribution of collapsed buildings;

(c) Distribution of newly built uncollapsed buildings

图7a中东南方较大区域斑块为村委会建筑,塔县地震后库孜滚村的未倒塌建筑物主要集中在村委会以北,尤其是安居富民房区域,房屋均未倒塌。安居富民房屋展现出较好的抗震性能。图7b中倒塌建筑物主要集中在村委会周围及村委会以南,该地区的房屋质量较差,抗震性能低,在地震中成片倒塌,此处为救援重点地区。在进行震前、震后建筑物信息变化检测中,2015年后新建建筑物被提取出来,由于经济水平的提高,该区域近年新建的建筑物质量较好,在地震中展现了较好的抗震性能。在新增建筑物中,位于安居富民房区域内的新增建筑物主要为抗震救灾帐篷搭设区。为更好地安置转移的地震受灾人员,使受灾人员集中便于管理,救灾帐篷搭设在安居富民房屋附近。

3.2 基于像元的建筑物震害信息提取

为了更好地说明本文方法用于震害信息提取的效果,进行了多种方法的对比,选择的方法主要有基于像元级的分类方法和基于目标级的面向对象分析方法,并对不同方法的计算结果进行比较。

像元级分类方法主要是利用地震现场信息及研究区的各类地物特征,结合影像识别地物影像特征及解译标志,并建立分类样本,采用支持向量机(support vector machine, 缩写为SVM)方法对影像直接进行像元级信息提取。信息提取结果如图8a所示。

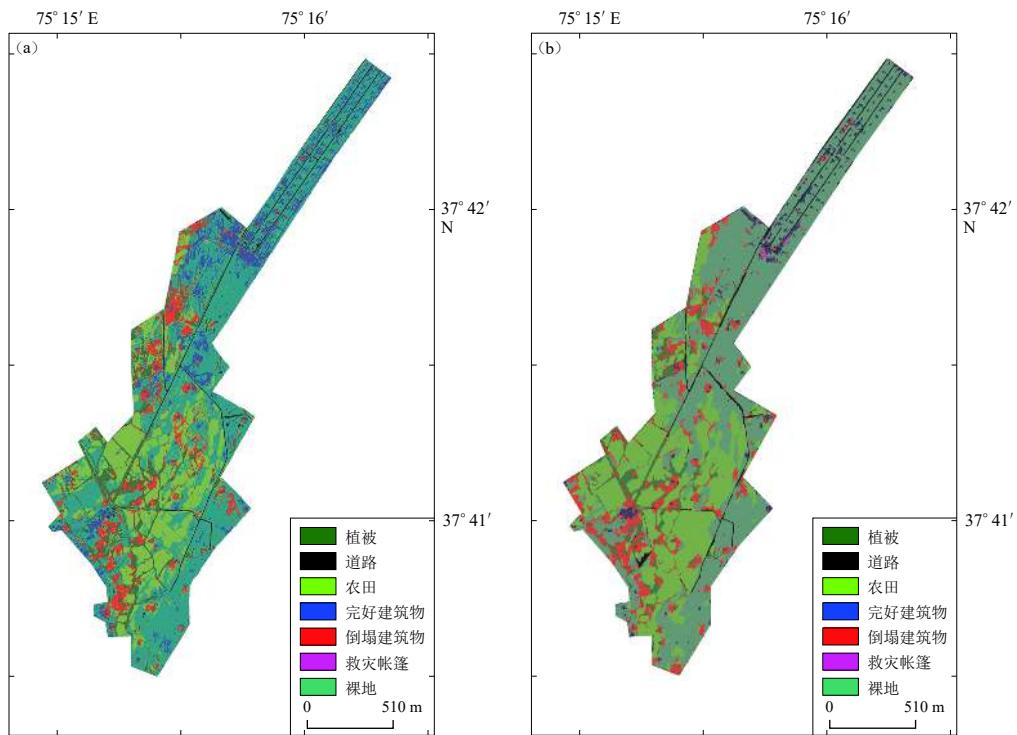


图 8 支持向量机法(a)和面向对象方法(b)的建筑物震害信息提取结果图

Fig. 8 Extraction result of seismic damage information of buildings

by Support Vector Machine method (a) and by object-oriented method (b)

像元级信息提取是在建立精确地物解译标志及选择合适的信息提取方法的前提下，可以检测出倒塌建筑物的空间分布情况。由图 8a 可知，由本文方法提取的倒塌建筑物的空间分布情况与基于像元级方法(支持向量机法)提取的结果大致相同，然而基于像元级信息提取所获得的倒塌建筑物(图中红色区域)存在着大量的误检，同时分类结果存在椒盐效应。这是由于建筑物倒塌后占地面积较原始建筑物占地面积大，故而基于像元级信息提取方法提取的倒塌建筑物比本文方法提取结果的面积更大，且提取结果破碎。基于像元级信息提取方法是依据地物光谱信息分类提取的，同一地物光谱信息越集中，与其它地物光谱差别越大，提取效果越好，然而现实中多存在“同物异谱”和“异物同谱”现象，如倒塌建筑物区域与粗糙裸地的光谱接近，这使得基于像元级倒塌建筑物信息提取结果的误提信息较多，信息提取结果精度偏低。

3.3 基于目标的建筑物震害信息提取

面向对象方法是一种基于目标的分类方法，该方法不再是基于像素尺度进行分类，而是通过多尺度分割将遥感影像分割为多个目标，综合考虑影像空间特征、光谱特征、纹理特征、几何特征等因素，得到较高精度的信息提取结果。

面向对象方法分类的关键是多尺度影像分割技术。选择的分割尺度越小，越易出现误检现象，其原因在于，过小的分割尺度使得地物分割过于破碎，提取结果破碎且效果不佳。相反，选择的分割尺度太大，易出现漏检现象，即建筑物震害信息未被准确提取。其原因是分

割尺度太大会使多种地物分割到一起,小斑块的地物容易被分割到周边大斑块地物中,使得建筑物震害信息无法准确地被提取出来。本研究经过反复试验,找到合适的分割尺度进行影像多尺度分割,进而进行面向对象信息提取,结果如图 8b 所示。

目标级建筑物震害信息提取虽然有效地避免了椒盐效应,所提取的信息相对连续,但仍存在其它地物被错误识别为震害建筑物的问题。这是由于在多尺度分割过程中,倒塌建筑物出现过多的碎块,使得倒塌建筑物本身的形状特征不能很好地参与到分类过程中,导致最终分类结果中有部分植被、农田和裸地被混淆。

3.4 不同方法提取结果的比较

为定量分析试验结果,对本文方法、像元级、目标级信息提取方法分别进行精度评价。本文结合现场调查信息和地震现场无人机影像以及震前 google 影像,进行无人机影像目视解译,将其作为精度评估样本。无人机影像覆盖区域、目视解译结果与本文提取结果的对比如图 9 所示,主要覆盖震后完好建筑物分布区域和倒塌建筑物连片分布区域,精度指标采用的总体精度和 Kappa 系数列于表 1。

由表 1 不难发现,相较单一的像元级和目标级信息提取方法,本文方法的总体精度分别提高了 5.78% 和 5.23%,其中:像元级信息提取方法中,倒塌建筑物主要将农田、裸地误提进来,误提率为 7.75% 和 4.22%;目标级信息提取方法中,倒塌建筑物主要将裸地、农田和

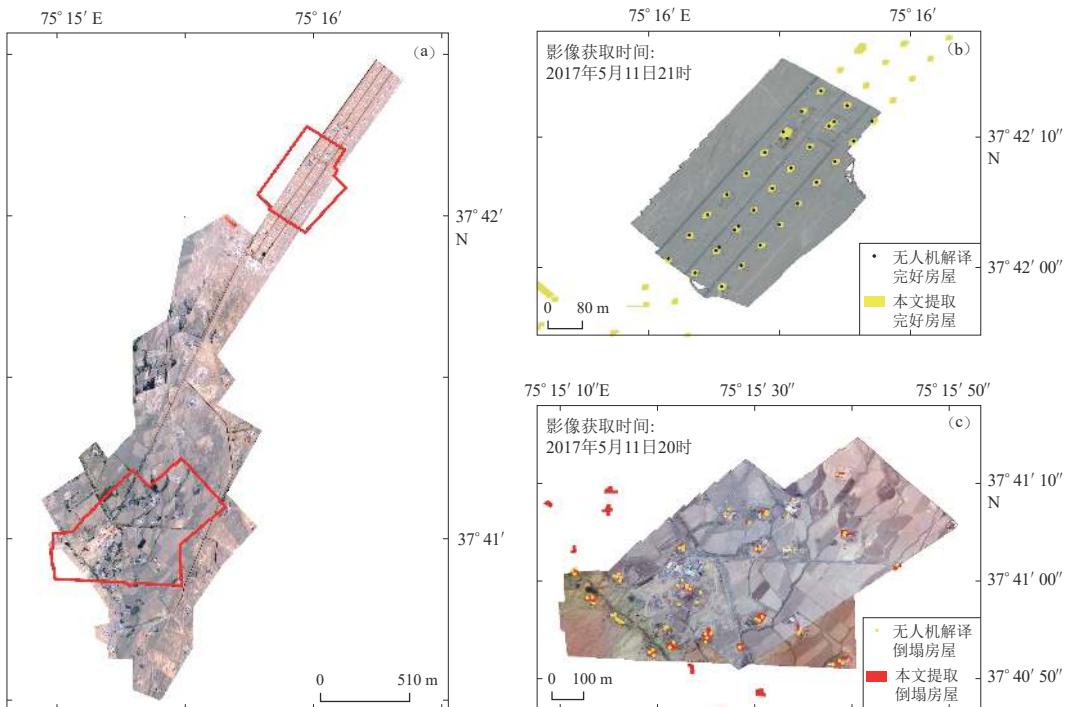


图 9 无人机影像区域提取结果对比图

(a) 无人机影像覆盖区域; (b) 安居富民房航拍区对比结果图; (c) 村委会附近航拍区对比结果图

Fig. 9 Contrast Map of UAV Image Region

(a) UAV images coverage area; (b) Comparison of aerial photography area of the rural housing project in Xinjiang; (c) Comparison of aerial photography area near village committee

表 1 不同提取方法分类精度的比较

Table 1 Comparison of classification accuracy with different extraction method

分类方法	总体精度	Kappa系数
本文方法	90.45%	0.87
支持向量机法	84.67%	0.78
面向对象分析法	85.22%	0.79

植被误提进来，误提率为 5.31%，5.05% 和 2.84%；本文方法提取的建筑物震害信息是基于震前、震后建筑物提取结果对比分析的基础上所获，提取的倒塌建筑物主要为 2015 年 9 月后消失的建筑物，但由于在建筑物震害信息提取中未考虑人为因素，存在误提现象。

今后尚需结合像元级和目标级震害信息提取方法进行误提部分剔除，进一步提高信息提取精度。

4 讨论与结论

本文结合纹理和形态学特征方法进行了基于国内高分遥感影像的建筑物震害信息提取研究，提取了 2017 年 5 月 11 日新疆塔县 $M_{\text{S}}=5.5$ 地震极灾区库孜滚村在地震前后真实的建筑物空间分布数据，通过变化检测分析，获取了研究区倒塌建筑物空间分布信息，并结合其它方法进行了信息提取结果精度的对比。本文结果表明：结合纹理和形态学特征的方法能较好地提取高分遥感影像中的建筑物信息，本方法对基于国产高分影像进行建筑物震害信息提取具有较高的正确率和鲁棒性；通过对地震前后建筑物提取结果进行变化检测分析，能够有效地提取完全倒塌的建筑物，信息提取总体精度为 90.45%；对比单一的像元级和目标级信息提取方法，本文方法的总体精度分别提高了 5.78% 和 5.23%。

本文仍存在一些不足，如本文仅提取了完全倒塌的建筑物，对于部分倒塌及未倒塌但严重破坏的建筑物并未涉及，今后应对不同震害类型进行更加细致的影像特征分析，建立更加丰富的建筑物震害特征库及专家知识库，便于探求新的模型方法，进行多类型震害信息识别，提高震害识别精度。本文建筑物信息提取的总体精度较高，但仍存在误差和噪声，对震害信息检测产生影响。为保证震害信息提取精度，结合人工修正方法效果会更佳。对于不同的震例，震害表现多有不同，不同地区的地物特征多有不同，今后需多加实践检验，根据地物特征及建筑物震害特点进行针对性的信息提取方法设计。

总的来看，结合纹理和形态学特征方法可用于提取高分遥感影像中的建筑物震害信息，在震害严重、救灾任务紧急的情况下，借助国产高分遥感卫星采集极灾区高分遥感影像，通过自动提取方法可以快速获取灾区倒塌建筑物的空间分布情况，为震后快速确定人员压埋点、部署救援力量提供决策依据，提高地震应急救援的时效性。

参 考 文 献

- 李金香, 李亚芳, 李帅, 王伟, 陈勇. 2016. 面向地震应急准备的居民地遥感提取及量化分析 [J]. 地理科学, 36(11): 1743–1750.
- Li J X, Li Y F, Li S, Wang W, Chen Y. 2016. Remote sensing extraction and quantitative analysis of residential area for earthquake emergency preparedness[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 36(11): 1743–1750 (in Chinese).
- 林祥国, 张继贤. 2017. 面向对象的形态学建筑物指数及其高分辨率遥感影像建筑物提取应用 [J]. 测绘学报, 46(6): 724–733.
- Lin X G, Zhang J X. 2017. Object-based morphological building index for building extraction from high resolution remote sensing imagery[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(6): 724–733 (in Chinese).

- 柳稼航, 杨建峰, 魏成阶, 关泽群. 2004. 震害信息遥感获取技术历史、现状和趋势[J]. *自然灾害学报*, 13(6): 46–52.
- Liu J H, Yang J F, Wei C J, Guan Z Q. 2004. Acquisition of earthquake damage information based on remote sensing technology: History, current situation and trend[J]. *Journal of Natural Disasters*, 13(6): 46–52 (in Chinese).
- 欧阳平, 张玉方. 2009. 形态学开闭运算在居民地边缘检测中的应用[J]. *测绘通报*, (1): 40–41.
- Ouyang P, Zhang Y F. 2009. Application of morphology open and close operation in resident edge detection[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (1): 40–41 (in Chinese).
- 王光霞, 杨培. 2000. 数学形态学在居民地街区合并中的应用[J]. *测绘学院学报*, 17(3): 201–203.
- Wang G X, Yang P. 2000. Application of mathematic morphology in uniting blocks of residential area[J]. *Journal of Institute of Surveying and Mapping*, 17(3): 201–203 (in Chinese).
- 王龙, 王晓青, 丁香, 窦爱霞. 2007. 基于遥感和GIS的建筑物震害损失评估方法研究与实现[J]. *地震*, 27(4): 77–83.
- Wang L, Wang X Q, Ding X, Dou A X. 2007. Study on loss assessment of construction earthquake damage based on remote sensing and GIS[J]. *Earthquake*, 27(4): 77–83 (in Chinese).
- 王晓青, 魏成阶, 苗崇刚, 张景发, 单新建, 马庆尊. 2003. 震害遥感快速提取研究: 以2003年2月24日巴楚—伽师6.8级地震为例[J]. *地学前缘*, 10(增刊1): 285–291.
- Wang X Q, Wei C J, Miao C G, Zhang J F, Shan X J, Ma Q Z. 2003. The extraction of seismic damage from remote sensing images: A case study of Bachu-Jiashi earthquake with $M_s=6.8$ occurred on Feb. 24, 2003[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 285–291 (in Chinese).
- 王晓青, 黄树松, 丁香, 崔丽萍, 窦爱霞, 李旖雯. 2015. 尼泊尔8.1级地震建筑物震害遥感提取与分析[J]. *震灾防御技术*, 10(3): 481–490.
- Wang X Q, Huang S S, Ding X, Cui L P, Dou A X, Li Y W. 2015. Extraction and analysis of building damage caused by Nepal $M_s8.1$ earthquake from remote sensing images[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 10(3): 481–490 (in Chinese).
- 叶昕, 王俊, 秦其明. 2016. 基于高分一号卫星遥感图像的建筑物震害损毁检测研究: 以2015年尼泊尔 $M_s8.1$ 地震为例[J]. *地震学报*, 38(3): 477–485.
- Ye X, Wang J, Qin Q M. 2016. Damaged building detection based on GF-1 satellite remote sensing image: A case study for Nepal $M_s8.1$ earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 477–485 (in Chinese).
- 余先川, 安卫杰, 贺辉. 2012. 基于面向对象的无监督分类的遥感影像自动分类方法[J]. *地球物理学进展*, 27(2): 744–749.
- Yu X C, An W J, He H. 2012. A method of auto classification based on object oriented unsupervised classification[J]. *Progress in Geophysics*, 27(2): 744–749 (in Chinese).
- 翟辉琴, 王明孝. 2005. 小波变换和数学形态学的高分辨率图像居民地识别[J]. *地理信息科学*, 7(4): 25–28.
- Zhai H Q, Wang M X. 2005. The habitat abstraction of the high resolution remote sensing imagery based on wavelet transform and mathematics morphologic subject[J]. *Geo-Information Science*, 7(4): 25–28 (in Chinese).
- 翟永梅, 陈刚, 黄晓峰. 2015. 面向对象遥感图像处理方法在建筑物震害评估中的应用研究[J]. *防灾减灾学报*, 31(1): 16–21.
- Zhai Y M, Chen G, Huang X F. 2015. Research on application of object-oriented analysis to assessment of earthquake damage from remote sensing image[J]. *Journal of Disaster Prevention and Reduction*, 31(1): 16–21 (in Chinese).
- 张景发, 谢礼立, 陶夏新. 2002. 建筑物震害遥感图像的变化检测与震害评估[J]. *自然灾害学报*, 11(2): 59–64.
- Zhang J F, Xie L L, Tao X X. 2002. Change detection of remote sensing image for earthquake-damaged buildings and its application in seismic disaster assessment[J]. *Journal of Natural Disasters*, 11(2): 59–64 (in Chinese).
- 张景发, 李强, 焦其松. 2017. 建筑物震害多源遥感特征与机理分析[J]. *地震学报*, 39(2): 257–272.
- Zhang J F, Li Q, Jiao Q S. 2017. Multi-source remote sensing characteristics and mechanism analyses of building seismic damages[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 39(2): 257–272 (in Chinese).
- 张志强, 张新长, 辛秦川, 杨晓羚. 2018. 结合像元级和目标级的高分辨率遥感影像建筑物变化检测[J]. *测绘学报*, 47(1): 102–112.
- Zhang Z Q, Zhang X C, Xin Q C, Yang X L. 2018. Combining the pixel-based and object-based methods for building change

- detection using high-resolution remote sensing images[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, **47**(1): 102–112 (in Chinese).
- 赵妍, 张景发, 姚磊华. 2016. 基于面向对象的高分辨率遥感建筑物震害信息提取与评估[J]. *地震学报*, **38**(6): 942–951.
- Zhao Y, Zhang J F, Yao L H. 2016. Seismic damage information extraction and evaluation of buildings with high resolution remote sensing based on object-oriented method[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **38**(6): 942–951 (in Chinese).
- Dong L G, Shan J. 2013. A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques[J]. *ISPRS J Photogr Remote Sens*, **84**: 85–99.
- Haralick R M. 1979. Statistical and structural approaches to texture[J]. *Proceedings of the IEEE*, **67**(5): 786–804.
- Huang X, Zhu T T, Zhang L P, Tang Y Q. 2014. A novel building change index for automatic building change detection from high-resolution remote sensing imagery[J]. *Remote Sens Lett*, **5**(8): 713–722.
- Turker M, Cetinkaya B. 2005. Automatic detection of earthquake-damaged buildings using DEMs created from pre- and post-earthquake stereo aerial photographs[J]. *Int J Remote Sens*, **26**(4): 823–832.
- Turker M, Sumer E. 2008. Building-based damage detection due to earthquake using the watershed segmentation of the post-event aerial images[J]. *Int J Remote Sens*, **29**(11): 3073–3089.
- Yamazaki F, Yano Y, Matsuoka M. 2005. Visual damage interpretation of buildings in Bam city using QuickBird images following the 2003 Bam, Iran, earthquake[J]. *Earthq Spectra*, **21**(S1): 329–336.