

袁小祥、王晓青、丁香等,2017,基于无人机影像的九寨沟地震建筑物震害定量评估,中国地震,33(4),582~589。

基于无人机影像的 九寨沟地震建筑物震害定量评估

袁小祥 王晓青 丁香 窦爱霞 王书民 丁玲

中国地震局地震预测研究所,北京市复兴路 63 号 100036

摘要 利用 2017 年 8 月 8 日九寨沟 7.0 级地震震后获取的无人机影像,结合地面震害调查资料,分析各类建筑物震害特征,建立建筑物震害无人机遥感解译标志;选取地震灾区漳扎镇(部分区域)和荷叶寨 2 个区域作为研究区,进行了无人机遥感建筑物震害提取,基于遥感震害指数进行了震害定量评估,并与现场建筑物震害调查统计结果进行了比较验证。结果显示,遥感解译建筑物震害与实际震害程度相吻合,表明利用震后快速获取的高分辨率无人机影像,可以较为准确地识别建筑物震害,进而为地震灾害定量评估和应急救援辅助决策提供重要参考。

关键词: 无人机 震害评估 定量评估 九寨沟 7.0 级地震

[文章编号] 1001-4683(2017)04-0582-08 [中图分类号] P315.9 [文献标识码] A

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川省阿坝州九寨沟县(33.2°N,103.82°E)发生 7.0 级强烈地震,震源深度 20km,震中距离最近的漳扎镇约 10km(图 1)。该地震不仅造成 25 人遇难,数人失联,数百人受伤,而且还造成大量建筑物破坏及次生灾害,人民的生命财产遭受极大的损失。

及时准确的地震灾情信息是震后开展应急救援、最大限度减轻地震灾害损失的重要保障(王晓青等,2015;柳稼航等,2004)。遥感具有宏观、非接触等特点,能够快速获取地震灾区大范围的、丰富的建筑物、次生灾害等灾情信息,很早就被用于震害信息获取(柳稼航等,2004;王晓青等,2003)。随着遥感数据的多源化以及时效性、分辨率的逐步提高,基于遥感影像的定量评估技术被越来越多地应用于大震应急救援及灾害评估中。王晓青等(2008、2009)利用震后获取的多种卫星影像资料进行了汶川 8.0 级地震遥感应急震害评估;利用都江堰等城乡大量建筑物震害遥感比对调查结果,进行了震害遥感定量评估,并建立了遥感震害指数与地面调查震害指数之间的定量关系,为利用遥感手段进行震后应急震害评估提供了方法和模型基础。芦山 7.0 级地震发生后,王晓青等(2015)采用上述方法模型,利用震后

[收稿日期] 2017-10-15; [修定日期] 2017-10-26

[项目类别] 科技部重点研发课题(2017YFB0504104)、中国地震预测研究所基本科研业务专项(2013 IES0204)联合资助

[作者简介] 袁小祥,男,1983 年生,助理研究员,主要从事地震应急遥感应用技术研究。E-mail: yuanxx1983@163.com

王晓青,通讯作者,男,1963 年生,研究员,主要从事地震风险评估、地震应急遥感评估等研究。

E-mail: wangxiaog517@163.com

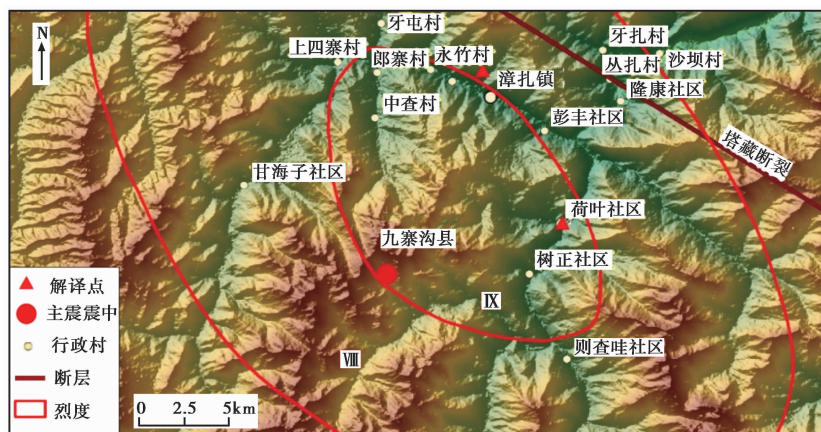


图 1 九寨沟地震极震区地势景观^①

应急获取的高分辨率航空影像和无人机影像,快速提取了灾区建筑物震害信息,并在此基础上对灾区 100 多个居民点进行了快速震害遥感定量评估,得到了与实地调查较为吻合的遥感烈度评估结果。窦爱霞等(2012)、王晓青等(2013)分别以玉树 7.1 级地震为例,基于遥感平均震害指数和综合震害指数,开展了利用震后高分辨率遥感资料进行震害快速定量评估的研究,为震后应急中震害与地震烈度遥感定量评估提供了实用化的思路和应用案例。

近年来,无人机遥感平台及飞控技术得到快速发展。无人机飞行高度低,具备云下摄影、响应迅速等诸多优点,越来越贴近震后应急救援与评估的时间需求,且无人机获取的超高分辨率影像,能够提供更多的建筑物震害细节信息,可以更加准确地对低烈度区震害程度相对较轻的建筑物进行识别,显著提高建筑物震害程度的遥感识别能力。本文利用九寨沟地震震后获取的一系列高分辨率无人机影像,结合现场调查资料,进行无人机遥感建筑物震害解译标志建立,在前人研究的基础上,以该地震灾区 2 处典型地区作为研究区进行无人机建筑物震害信息定量提取与评估研究,以期为今后进行大震无人机快速定量评估提供参考。

1 数据收集及处理

九寨沟地震发生后,中国地震局和国家测绘地理信息局等单位迅速组织人员赶赴灾区,使用固定翼和多旋翼无人机进行灾情遥感影像获取工作。本文以漳扎镇三组(简称漳扎)和荷叶寨一组(简称荷叶)为研究区,主要使用 2017 年 8 月 13 日中国地震应急搜救中心获取的固定翼无人机影像(分辨率约 0.10m)、2017 年 9 月 6 日笔者所在的研究组利用旋翼无人机获取的荷叶寨的震后影像(分辨率约 0.02m)(图 1)。获取的无人机影像主要包括序列航拍照片和与之匹配的姿态数据(POS),本文利用 Photo Scan 软件,采用运动信息中恢复三维场景结构(Structure from Motion, SfM)方法在应急模式下进行处理(赵云景等,2015)。首先,导入拍摄的无人机影像数据,并进行 POS 数据编辑;然后,对每幅影像进行特征点匹配,根据

^① 中国地震局,2017,四川九寨沟 7.0 级地震烈度图。<http://www.cea.gov.cn/publish/dizhenj/464/478/20170812211337414565961/index.html>.2017.8.12

多目视觉原理进行 SfM 三维重建,获取相机和稀疏点云的真实空间位置;最后,在重建地形的基础上进行相应区域的正射影像生成。由于应急模式下生成的正射影像与真实坐标存在一定的误差,需要对该正射影像与高分辨率底图进行配准。

通常情况下,无人机影像反映更多的是建筑物的顶部信息,因而往往对建筑物震害判断较轻。为了更好地建立无人机影像震害解译标志,笔者所在的研究团队于 2017 年 8 月 31 日~9 月 8 日进行九寨沟地震现场建筑物震害实地调查,其中,共涉及本文 2 个研究区的 100 多栋有效单体建筑物。实地调查结果表明,研究区的建筑物结构类型主要包括土木结构、砖木结构、砖混结构、框架结构等。对每个建筑物单体进行了建筑年代、建筑面积和破坏程度等的调查。其中,破坏程度按照毁坏(倒塌)、毁坏(未倒塌)、严重破坏、中等破坏、轻微破坏及基本完好等 6 级(王晓青等,2013)进行评定。

2 无人机遥感建筑物震害评估

2.1 遥感震害指数

遥感震害指数(王晓青等,2009)是利用遥感资料定量确定灾区震害程度的指标。同一地震中,不同地点、不同结构类型的震害程度不同。为了定量评估震害程度,某一调查点结构类型 i 的遥感平均震害指数 $\overline{d}_i^{\text{RS}}$ 按下式计算

$$\overline{d}_i^{\text{RS}} = \frac{\sum_j d_{ij}^{\text{RS}} n_{ij}^{\text{RS}}}{\sum_j n_{ij}^{\text{RS}}} \quad (1)$$

式中, d_{ij}^{RS} 为第 i 类房屋、破坏等级为 j 的平均震害指数,震害指数为 1 表示全部毁坏,为 0 表示完好无损; n_{ij}^{RS} 为遥感判读的第 i 类房屋、房屋破坏等级为 j 的建筑物栋数或建筑面积。通过无人机影像判读的建筑物破坏等级参考上述地面调查震害的 6 级划分方案。

2.2 无人机震害解译标志

通常航天、航空遥感手段由于影像空间分辨率的限制,目视判读的建筑物破坏等级有限,一般只能识别未倒塌、部分倒塌和倒塌等 3 类。与以往遥感震害评定不同的是,本文使用高(甚至超高)分辨率无人机影像判读建筑物破坏等级。因此,本文尝试按照地面震害调查中将建筑物震害划分为上述 6 级,结合现场建筑物单体震害详查资料建立基本完好至毁坏(未倒塌)的不同等级的建筑物震害无人机影像解译标志(图 2)。通过分析,得到各建筑物震害级别遥感解译标志如下。

基本完好:图 2(a)、2(b)为 2012 年前后建成的 4 层框架结构房屋。地面调查显示,该房屋整体结构完好,但外墙有少量轻微裂缝,屋顶瓦有一定程度破坏,震害等级为基本完好。影像显示,该建筑物轮廓较为清晰、完整,南侧为现浇楼面,边缘清晰,色调规则,建筑物周围无明显纹理或者色调突变,屋顶无明显或者较轻的破坏,色调总体过渡自然,顶层砖木结构部分人字形屋顶有少量落瓦发生轻微色调变化。

轻微破坏:图 2(c)、2(d)为荷叶 1990 年代建成的 2 层土木结构民居。地面调查显示,该房屋在窗角等部位有轻微裂缝,经过简单修缮后可继续使用,震害等级为轻微破坏。影像上显示,房屋为人字形屋顶,覆盖青瓦,震害特征表现为少数因轻微落瓦造成的相对亮斑状



图 2 无人机震害解译标志

图(a)、(c)、(e)、(g)、(i)为无人机影像；图(b)、(d)、(f)、(h)、(j)为现场照片

纹理,但是屋面及墙体保持较好,影像显示规则纹理特征,建筑物周围无墙倒塌或屋面滑落造成的不规则影像色调变化特征,几何形状较规则。

中等破坏:图 2(e)、2(f)为荷叶 1990 年代建成的 2 层土木结构民居,其中,第 2 层为木结构。地面调查显示,第 1 层有部分片石材料的墙体外闪,震害等级为中等破坏。震害影像特征表现为,屋顶部分中等规模落瓦,可见明显漏顶现象,造成色调明显不均匀;屋脊破坏形成显著亮色纹理;山墙部分墙体倒塌形成小规模废墟造成影像局部色调相对变化(图 2(e)中的 A),屋面四周轮廓形状呈规则状。

严重破坏:图 2(g)、2(h)为漳扎 1990 年代后期建成的 2 层砖木结构房屋。地面调查可见该民居主体为木屋架,且较为完好,一侧山墙全部外闪,其他外墙有部分外闪,震害等级为严重破坏。影像显示,自然深色调的屋面上由于落瓦造成较大面积高亮显示区域,房屋其他边缘轮廓外有因部分墙体倒塌而形成的局部废墟影像,凌乱的堆积物破坏了原图像特征造成明显的明暗相间色调变化,如图 2(g)B 中箭头所示。

毁坏(未倒塌):图 2(i)、2(j)为漳扎 2010 年之后建立的 1 层砖木结构房屋。地面调查可见该房屋主体受到严重破坏,屋顶部分坍塌,一侧山墙严重外闪,部分砖石材料堆积房屋外侧,震害等级为毁坏(未倒塌)。影像上显示,房屋一侧屋顶扭曲,轮廓不完整,色调、纹理明显不对称,一侧墙角不规则高亮色调与屋顶色调形成明显对比(图 2(i)箭头所示),塌陷部分屋顶阴影色调明显不对称分布。

需要说明的是,由于研究区缺乏毁坏(倒塌)建筑物样本,本文未给出遥感解译标志,可参考资料^②进行定量评估。

2.3 研究区震害遥感定量评估

利用 2.2 建立的建筑物震害遥感解译标志,对研究区的建筑物按照 4 种结构类型和 6 个震害等级逐栋目视判读,共解译 148 栋建筑物及其震害等级(图 3)。其中,漳扎建筑物结构类型主要为砖混、框架结构,分别占 50%、35%;主要震害级别为轻微破坏(占 37.1%)和基本完好(占 32.2%),其他包括毁坏(未倒塌)(占 3.2%)、严重破坏(占 11.3%)和中等破坏(占 16.2%)。荷叶建筑物结构类型主要为砖木、砖混结构,分别占 48%、30%;主要震害级别为轻微破坏(占 47.7%)和基本完好(占 40.7%),其他为中等破坏(占 11.6%)。

为定量评估研究区总的震害程度,设单体建筑物各震害等级的平均震害指数(王晓青等,2009)分别为:毁坏(未倒塌)1.0,严重破坏 0.9,中等破坏 0.4,轻微破坏 0.2,基本完好 0。对所解译的单体建筑物利用式(1)进行统计计算,得到漳扎和荷叶 2 个地区的遥感震害指数分别为 0.25、0.14,依据《中国地震烈度表》(中国国家标准化管理委员会等,2009),其烈度估计值均为Ⅷ度。其中,遥感震害评估的结果,在漳扎与地面调查烈度一致,但在荷叶比地面调查烈度轻。总体来看,无人机影像判读结果显示,该研究区建筑物震害主要集中在严重破坏、中等破坏、轻微破坏及基本完好等级内。漳扎研究区建筑物年代相对较新,砖混、砖木结构建筑的墙体大多为土、石材料,形成的震害图像特征较明显,且该地区影像为 8 月 13 日获取,地震离逝时间较短,较为真实地反映了原生震害程度。荷叶区域无人机影像判读结果没有发现毁坏(未倒塌)及严重破坏类型,由于荷叶无人机影像为震后 9 月 6 日现场调查获取

^② 窦爱霞等,2014,地震灾害遥感评估(第 3 部分):建筑物震害

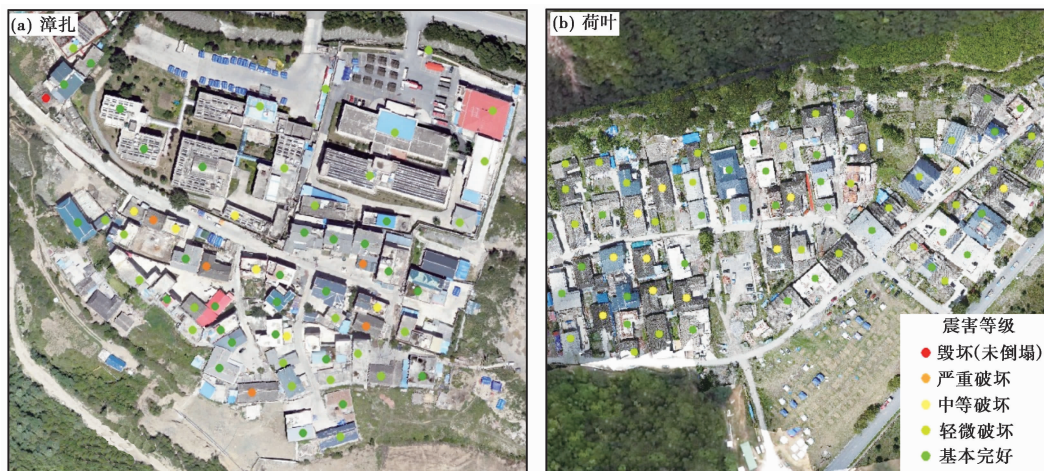


图 3 无人机建筑物震害等级判读结果

的,此时,灾区部分房屋已进行了废墟清理和房屋修复(如屋顶瓦重新进行了铺设)。因此,造成部分建筑物震害遥感解译结果相对于原生震害存在偏轻的现象,且荷叶区域结构类型大多数为木结构房屋,相对抗震性能较好,存在客观偏轻的因素。

2.4 遥感定量评估结果验证

为了验证建筑物震害遥感解译结果,将其与笔者现场进行的单体建筑物震害调查结果进行比较分析,得到表 1(漳扎)和表 2(荷叶)的无人机遥感解译震害与现场调查震害的比对混淆矩阵。表 1、2 的统计分析结果表明,与地面真实震害比较,漳扎研究区建筑震害遥感识别总体精度为 85%,Kappa 系数为 0.8,显示较高的一致性;荷叶研究区建筑震害遥感识别总体精度为 72%,Kappa 系数为 0.5,显示中度一致性。表明建筑物震害遥感解译结果在漳扎研究区正确率较高,一致性好,但在荷叶研究区建筑震害遥感识别总体精度相对低一些。

表 1 漳扎研究区建筑物震害遥感解译与现场调查结果对比

		地面调查						合计
		毁坏(倒塌) /栋	毁坏(未倒塌) /栋	严重破坏 /栋	中等破坏 /栋	轻微破坏 /栋	基本完好 /栋	
无人 机影 像解 译	毁坏(倒塌)/栋	0	0	0	0	0	0	0
	毁坏(未倒塌)/栋	0	2	0	0	0	0	2
	严重破坏/栋	0	1	5	1	0	0	7
	中等破坏/栋	0	0	0	9	1	0	10
	轻微破坏/栋	0	0	1	1	18	3	23
	基本完好/栋	0	0	0	0	1	19	20
合计		0	3	6	11	20	22	62

上述验证结果表明,遥感解译结果与地面调查结果总体上具有较好的一致性,但也存在一定差别。究其原因,主要是由于无人机正射镶嵌影像一般只能直接反映建筑物顶部震害信息,通过建筑物周围出现的废墟影像特征可亦间接反映墙体倒塌信息,而建筑物墙体和梁

表 2 荷叶研究区建筑物震害遥感解译与现场调查结果对比

		地面调查						合计
		毁坏(倒塌)/栋	毁坏(未倒塌)/栋	严重破坏/栋	中等破坏/栋	轻微破坏/栋	基本完好/栋	
无人 机影 像解 译	毁坏(倒塌)/栋	0	0	0	0	0	0	0
	毁坏(未倒塌)/栋	0	0	0	0	0	0	0
	严重破坏/栋	0	0	0	0	0	0	0
	中等破坏/栋	0	0	0	6	2	0	8
	轻微破坏/栋	0	0	0	4	32	11	47
	基本完好/栋	0	0	0	0	7	24	31
	合计	0	0	0	10	41	35	86

柱等部件的开裂、变形、甚至坍塌等重要现象一般无法反映,这难免造成一定程度的震害等级错判与轻判;另一个原因如上所述,震后废墟清理、部分建筑物屋顶瓦片重新铺设等情况使得遥感判读的建筑物震害等级相对偏轻,造成震害指数统计结果相对偏小。

3 结论与讨论

本文利用九寨沟地震震后获取的高分辨率无人机影像建立了建筑物不同震害等级的解译标志,并对荷叶、漳扎研究区建筑物及其震害进行了详细逐栋目视解译,获取了详细的建筑物结构类型和震害结果信息。利用遥感平均震害指数对建筑物震害进行了定量评估,得到了与同一研究区建筑物震害地面调查比较一致的结果。研究表明,利用震后快速获取的无人机影像可以为地震应急救援和灾情定量评估提供重要的参考。

区别于传统遥感影像,无人机影像可以提供更为丰富的震害细节信息,可以给出与地面调查震害等级类似的结果。但如果震后无人机影像获取时间较迟,因应急救援甚至恢复重建(典型的如屋面瓦的重新铺设)的缘故,原生震害信息可能很快消失,获取准确的震害分布的难度会进一步加大。因此,需要震后尽可能快速地获取灾区高分遥感影像。此外,随着更为丰富的无人机载荷如倾斜相机及 LiDAR 等的广泛应用,预期可以进一步降低对于建筑物类型和震害等级误判的概率。

致谢: 中国地震局应急搜救中心许建华、张雪华为本研究提供了部分震后高分辨率无人机影像。四川省地震局申源,中国地震局地震预测研究所邓飞、吴玮莹、邵霄怡、陈子翰、吴效勇、陈梦等参与现场调查与部分数据处理。审稿专家给出重要修改意见。在此一并致谢。

参考文献

窦爱霞、王晓青、丁香等,2012,遥感震害快速定量评估方法及其在玉树地震中的应用,灾害学,27(3),75~80。
 柳稼航、杨建峰、魏成阶等,2004,震害信息遥感获取技术历史、现状和趋势,自然灾害学报,13(6),46~52。
 王晓青、窦爱霞、孙国清等,2013,基于综合震害指数的玉树地震烈度遥感评估研究,地震,33(2),1~10。
 王晓青、窦爱霞、王龙等,2015,2013年四川芦山7.0级地震烈度遥感评估,地球物理学报,58(1),163~171。
 王晓青、王龙、王岩等,2008,汶川8.0级大地震应急遥感震害评估研究,震灾防御技术,3(3),251~258。
 王晓青、王龙、章熙海等,2009,汶川8.0级地震震害遥感定量化初步研究——以都江堰城区破坏为例,地震,29(1),174~

181。

王晓青、魏成阶、苗崇刚等,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,地学前缘,10(增刊I),285~291。

赵云景、龚绪才、杜文俊等,2015,PhotoScan Pro软件在无人机应急航摄中的应用,国土资源遥感,27(4),179~182。

中国国家标准化管理委员会、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2009,GB/T 17742-2008,中国地震烈度表,北京:中国标准出版社。

Quantitative assessment of building damage in disaster area of the Jiuzhaigou earthquake based on UAV images

Yuan Xiaoxiang Wang Xiaoqing Ding Xiang Dou Aixia

Institute of earthquake forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China

Abstract Using unmanned aerial vehicle (UAV) images acquired after the Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake on August 8, 2017, and the field damage survey data, characteristics of buildings with different seismic damage levels were analyzed and remote sensing interpretation features of buildings in different damage levels based on UAV images were built. Zhangzha and Heye villages were selected as study area, and the seismic damage levels of buildings were extracted by visual interpretation through UAV images. Then, the remote sensing seismic damage index was quantitatively assessed and compared with ground truth by field survey. The result shows that the remote sensing interpretation of building damage and actual damage degree is consistent. It also shows that the very high spatial resolution UAV images in the disaster area acquired immediately after an earthquake can accurately identify the damage of buildings and provide an important reference for earthquake disaster assessment and emergency rescue decision.

Key words: UAV; Earthquake disaster assessment; Quantitative assessment; Jiuzhaigou $M_s7.0$ earthquake