

面向地震应急调查的遥感应用现状及趋势分析

李强¹, 耿丹², 张景发¹, 龚丽霞¹

1. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085;

2. 二十一世纪空间技术应用股份有限公司, 北京 100096

摘要: 地震是一种会造成人类生命财产重大损失的突发性自然灾害, 震后第一时间启动应急响应并开展灾情的快速评估能有效地减轻地震灾害带来的破坏。空间对地观测技术为宏观性的地震应急与调查工作提供了便捷、经济的途径, 随着空间对地观测技术与数据处理技术的不断发展, 各国学者对遥感应急调查开展了大量深入的研究工作, 相关研究成果已广泛地应用于地震应急的实际工作中。但是, 遥感数据类型与处理技术的多样化也带来了应急信息的散乱, 导致遥感快速应急响应系统性不强, 使得应急服务不持续, 一定程度上限制了遥感技术的效能; 为此, 针对现阶段遥感技术在地震应急调查中的应用情况, 在总结地震应急调查常用遥感技术手段的基础上, 分析了遥感快速应急响应面临的技术挑战, 重点梳理了地震应急不同阶段对遥感数据及应急专题产品产出类型与时效性的现实需求, 结合震后灾区影像数据的情况, 系统地分析了光学、雷达、激光雷达遥感技术在地震应急调查应用中的技术现状与存在的问题。在实际地震应用案例分析的基础, 总结剖析遥感应急工作存在的问题, 并重点从海量数据快速处理、震害信息智能化提取、多源数据协同分析3个技术层面论述了遥感地震应急面临的核心困难, 基于此, 结合在轨数据实时、海量数据快速处理就灾情智能化识别的多技术联合、多源数据协同分析、发展敏捷卫星等几个方面论述了未来遥感技术在防震减灾中的发展趋势, 以期推动遥感监测手段提供动态、实时、持续的空间信息应急服务能力, 提高地震应急工作的快速响应、精细化与业务化应用能力。本文的研究可以为多源遥感技术在地震应急调查中的科研及业务应用提供很好的参考, 更高效的发挥遥感技术在防震减灾工作中的应用能力与水平。

关键词: 遥感, 地震, 应急调查, 应急专题产品, 震害信息提取

引用格式: 李强, 耿丹, 张景发, 龚丽霞. 2022. 面向地震应急调查的遥感应用现状及趋势分析. 遥感学报, 26(10): 1920-1934

Li Q, Geng D, Zhang J F and Gong L X. 2022. Application and trend analysis of remote sensing technology for earthquake emergency investigation. National Remote Sensing Bulletin, 26(10): 1920-1934 [DOI: 10.11834/jrs.20210078]

1 引言

地震是一种会造成人类生命财产重大损失的突发性自然灾害, 具有破坏范围广、突发性强、形变量大的特点 (Grant 等, 1999; 许才军等, 2010; 张昆祥等, 2019; Zhao 等, 2019)。历史上发生的几次强震, 如唐山地震、汶川地震、玉树地震、海地地震、尼泊尔地震、熊本地震等均造成了千上万人的伤亡, 给城市发展带来了巨大的阻碍。现阶段, 短时期内实现地震预测还是一个世界难题, 因此, 震后快速地开展地震应急并

实施有效的救援行动能大幅度的减轻地震带来的损失 (苗良田, 1990)。震区灾情信息的快速获取可为地震应急救援行动部署、救援力量调配提供有效的信息支撑, 同时也是灾情评估重要的依据, 是震后应急行动中重要的组成部分 (张景发等, 2002; 陈维锋等, 2014)。传统的地震灾害调查方式主要为人工实地调查, 灾情严重程度的判定带有一定主观性与经验性, 局限性的评估很难代表地震大区域宏观的破坏情况, 较难全局掌握灾区情况。通过震后通常会调派大量的人员深入震区开展调查, 既耗费人力, 又会随着余震的发生给

收稿日期: 2020-04-05; 预印本: 2021-04-19

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: No.41874059); 高分辨率对地观测重大专项(民用部分)(编号: 31-Y30B09-9001-20/22-04); 民用航天“十三五”预研第二批项目(编号: B0304); 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(编号: ZDJ-2019-32, ZDJ2017-29, ZDJ-2018-14)

第一作者简介: 李强, 研究方向为遥感地震应急、应急评估的理论和应用。E-mail: liqiang08@163.com

通信作者简介: 龚丽霞, 研究方向为遥感地震应急、SAR震害信息识别理论和应用。E-mail: xiaolongzhu1900@hotmail.com

调查人员带来生命危险。

空间对地观测技术为震区宏观调查、重点破坏区详细勘察提供了一条安全、经济的途径(李德仁, 2009), 伴随着载荷与平台技术的不断发展, 在地震应急需求的大背景下, 各类敏捷卫星、多平台、多载荷以及协同观测技术快速发展, 空间对地观测技术朝着天空地一体化方向发展, 遥感技术已在地震应急调查中得到了广泛的应用(李德仁等, 2017; 《卫星应用》编辑部, 2014), 为突发性的地震灾害应急应用提供了及时的信息保障。中国在邢台地震、唐山地震后开展了航空摄影, 这是中国较早地开展遥感地震应急与评估工作(陈立泽等, 2016; 李素菊和刘明, 2018); 随后在汶川地震、玉树地震、芦山地震、九寨沟地震等震后广泛开展了相应的遥感应急工作的研究(王猛等, 2010; 王丽涛等, 2010; 王晓青等, 2015; 李强等, 2019; 陈润等, 2020; 魏永明等, 2021), 并取得了卓有成效的成果。

本文在梳理地震应急工作对遥感技术需求的基础上, 总结分析了地震应急不同阶段对于遥感技术的需求及应急时效性要求, 系统性梳理了光学、SAR、LiDAR等遥感技术在地震应急调查研究中的发展现状, 深入分析了现阶段遥感地震应急与震害调查中存在的问题, 进而分析了未来遥感技术在震害应急调查中的发展趋势。

2 遥感地震应急

地震应急的概念最早来源于1961年日本颁布的《灾害对策基本法》中的“灾害应急对策”(萩原尊礼和孙永华, 1988; 王德迅, 2016)。1986年, 《地震对策》出版物中首次引入了地震应急的概念(聂高众等, 2012)。1991年, 国务院制定《国内破坏地震应急反应预案》, 在制定的预案中, 对“地震应急”的概念及应急的具体内容进行了详细阐述与解译(邢海灵等, 2005)。

遥感地震应急通常是指重特大地震发生之后, 通过调用卫星资源对震区开展监测, 获取震区的宏观影像, 并基于获取的遥感影像数据对震情进行分析, 用于辅助指导灾害应急的行动。高效合理的制定救援决策取决于对灾区灾情的掌握程度, 空间对地观测技术可提供灾情宏观有效的灾情信息(郭华东等, 2011), 因此高效、有序、合理地利用各类不同的遥感手段在不同应急阶段制作对

应的专题产品, 可有效的提高应急救援的针对性, 提高灾害应急响应的时效性与准确性。地震应急环境复杂, 不同的遥感平台、不同的传感器所获取的图像, 在地震应急中所产生的实际效果不同, 高-中-低分辨率、光学-雷达遥感卫星协同实现全天候监测、单体/全体调查和灾害普查与详查。应急不同阶段中对遥感影像的需求如图1所示。



图1 应急不同阶段对遥感影像的需求

Fig. 1 The demand of remote sensing image in different emergency stages

地震应急初期阶段(通常指灾后发生2小时内), 迫切需要快速了解灾情的严重程度与极灾区的分布范围, 需要的是卫星数据获取的高时效性, 这也是现阶段制约卫星应急的瓶颈; 此时, 中等分辨率遥感图像可满足本阶段需求, 如对具备高时间分辨率且可对目标区域长期“凝视”获取动态变化的高分四号卫可发挥重要的作用(范一大和吴玮, 2016)。在此阶段, 无论是光学影像还是SAR影像, 可相互协作, 互相补充, 均可提供有序、有效的灾情信息, 为应急初期决策提供重要的信息支撑。

随着应急工作的开展, 在应急中期阶段(通常指震后72h内), 此阶段是应急救援的黄金期, 需要对某些地震破坏严重的区域进行详查, 判定道路灾区道路交通的通行能力、地震次生灾害的空间分布、重点基础设施的损毁情况, 确认灾害的具体分布位置与空间范围等, 为现场应急救援指挥决策提供辅助决策信息。此时, 重点关注高空间分辨率遥感图像如高分1/2号、资源系列、航空影像、国外的Planet星座、TerraSAR等高分辨率SAR数据等可满足此阶段的需求(Dekker, 2011; 叶昕等, 2016; 任峰, 2017; 李强等, 2019), 实现灾情空间分布的详细监测。

应急阶段后期(通常指震后72h后), 需要的影像主要为亚米级影像及激光雷达图像, 用于开展地震烈度评估与灾情的精细调查; 同时, 基于获取的不同时相的SAR数据, 利用新型大地测量

技术之一的 InSAR 技术, 获取灾区同震形变信息, 进而对地震应力作用方式、特征和影响范围, 以及周围活动断裂是否受这种影响而有潜在的破裂可能性开展研究 (Wu 等, 2014), 为地震灾害开展地质学上的分析提供数据基础。

现阶段, 由于重特大地震的发生具有时空随机性, 空间对地应急观测资源相对有限, 观测资源分配及利用不合理难以满足多部门快速、动态、持续观测的需求, 因此有效地解决多需求、多资源的最优统筹规划是制约遥感应急时效性的技术瓶颈; 同时震后获取的数据质量也参差不齐, 专题产品类型也有所差异, 如何有效、有序地针对不同阶段开展遥感应急监测也是未来遥感地震应急需要解决的问题。

基于上述卫星数据分析结果, 可实现遥感地震应急专题产品的制作。遥感地震应急专题产品是指利用遥感图像为背景或者对遥感图像进行解译获取重点信息分布后制作的专题图件或报告, 专题产品可为应急指挥决策制定提供信息支撑 (谭庆全等, 2013)。现阶段, 基于遥感图像的地震应急专题产品主要包括极灾区范围、公路交通震害分布、建筑物震害分布、地震次生灾害分布、灾情评估报告等 (王晓青等, 2013)。

3 基于遥感数据的震害信息提取与调查应用现状

1906年劳伦斯将相机悬挂在风筝上首次采用遥感技术获取了旧金山地震的遥感图像 (吴焕娟等, 2006)。随着这次实验的成功, 日本、美国等国家在地震发生之后都会调用遥感技术对震区开展调查与监测。相比于国外, 中国在从20世纪60年代开始将遥感技术应用于灾情监测及震害信息提取, 如1975年海城地震 (王丽, 1988)、1976年唐山地震 (柳稼航, 2003)、1988年澜沧—耿马地震 (杨喆和程家喻, 1993) 和1989年大同地震 (王宏禄和白锐峥, 1992) 等, 在早期主要开展基于震后遥感技术的震害判读。陈鑫连和谢广林 (1996) 系统性地开展了基于遥感影像的震害提取与灾情评估工作。但是这些工作受客观条件的影响, 主要基于分辨率较低的光学卫星遥感影像及黑色航空影像, 震害调查方法主要是目视解译。随着遥感技术与图像处理技术的发展, 中国遥感技术在地震应用中得到了长足的发展, 并

取得了一系列的研究成果, 并在地震中得到应用与检验 (陈立泽等, 2016)。

震害信息快速有效的识别是遥感地震应急中的主要内容, 也是基于遥感数据开展应急指挥决策的重要参考依据 (王岩等, 2012)。Dong 和 Shan (2013) 系统性地梳理了光学、雷达、激光雷达等遥感技术在震害建筑物提取中的技术应用现状, 并分析了各类方法的优势与不足。

3.1 基于单时相遥感影像的震害信息提取

震后获取的影像类型包括光学影像、雷达影像和其他类型影像, 基于影像类型发展相应的信息提取方法。根据信息提取过程中人工的干预程度, 单时相遥感影像信息提取方法可分为人机交互、半自动与自动化提取方法。

3.1.1 光学图像

(1) 人工目视解译方法。人工目视解译方法是现阶段震后获取初步灾情信息的重要手段, 也是最常用的方法, 该方法相对较简单, 获取的结果也较为直观, 如在2015年4月25日尼泊尔发生8.1级地震之后, 获取了震区的高分二号遥感数据 (处理后空间分辨率为1 m), 采用人机交互的方式, 解译获取了震后损毁建筑物空间分布信息 (图2)。然而, 人机交互的解译方法在实际应用中存在一定的局限性, 概括起来可分为以下几方面: 1) 解译精度高但是信息获取效率较低; 2) 解译者需要具备基本的专业背景与经验知识, 否则容易造成误判; 3) 不同的解译人员由于专业背景、解译经验等因素, 通常会造成解译成果具有较大的差异。

(2) 监督/非监督分类方法。监督分类与非监督分类是基于图像像元的特征, 以像元为单位, 对像元特征进行统计分类, 从而实现分类的目的 (Rathje 等, 2005)。非监督分类不需要参考样本, 直接利用特征统计进行自主分类, 通常用于不确定地物类型数量的情况 (张德成, 1993; 朱博勤等, 1998); 监督分类是以提供的参考样本特征为基础, 实现相似特征像元的聚合 (Huyck 等, 2005)。

早期, 国内外专家学者基于光学遥感影像利用不同监督分类方法开展了震害信息提取应用研究 (柳稼航, 2003; Rathje 等, 2005; 李强和张景

发, 2013; 文翔 等, 2014)。监督分类既可提高信息识别的精度, 又可减轻判读人员的工作量, 在震害信息识别中得到了广泛的应用。2017年8月8日九寨沟地震后, 李强 (2018) 基于高分2号遥感影像, 采用支持向量机方法提取了震后的滑坡空间分布信息, 结果如图3所示, 提取精度达到85%以上。但是面对震后获取的海量遥感影像数据, 大量的样本选取工作还需要人工来进行选择, 信息识别的效率仍然很低下。

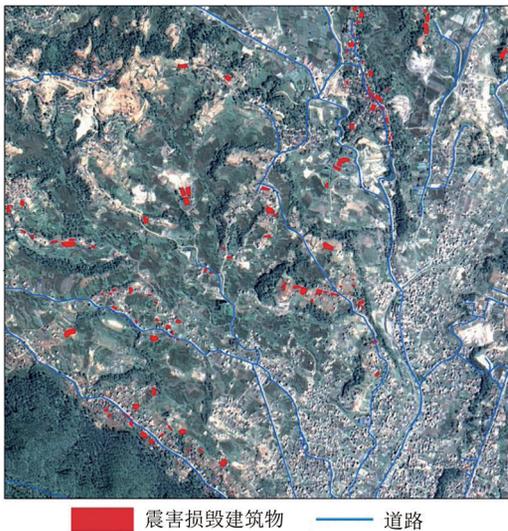


图2 基于目视解译的尼泊尔地震震害建筑物分布
Fig. 2 Distribution of earthquake damaged buildings in Nepal based on visual interpretation

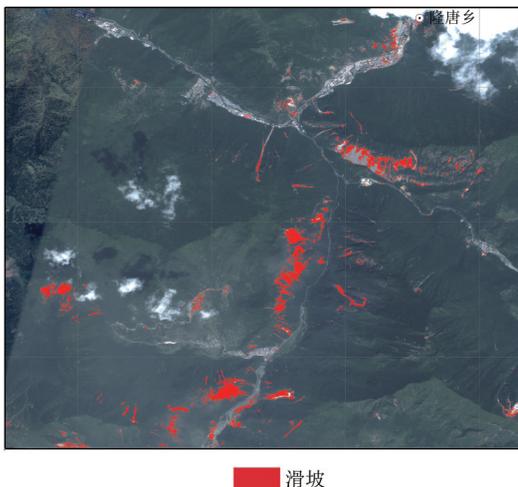


图3 基于监督分类的九寨沟地震次生灾害空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of secondary disasters of Jiuzhaigou earthquake based on supervised classification

(3) 面向对象分析方法。面向对象分类方法主要针对高分辨率遥感影像, 是将具有相似特征的像元进行聚合, 形成对象单元, 以对象为分析

的基本单元, 结合对象的光谱、纹理、几何形状特征等, 实现信息的提取 (Blaschke, 2010)。Baatz 和 Schäpe (1999) 首次将面向对象分析的概念引入到遥感图像信息提取中, 并获取了较好的分析结果; 之后, 面向对象分类方法在多个行业领域掀起了一片应用热潮, 在震害信息提取中也得到了广泛地应用 (Mitomi, 2001; Turker 和 San, 2004; Vu 等, 2005; 陈启浩, 2007; 赵福军和张磊, 2009; 彭令 等, 2017)。以尼泊尔地震震后高分二号遥感影像为例, 中国地震局地壳应力研究所震后第一时间利用面向对象方法提取了尼泊尔地区的损毁建筑物信息, 提取结果如图4所示, 与目视解译结果相比提取精度能到达83%以上。九寨沟地震后, 中国地震局地壳应力研究所团队获取了震后的无人机航拍影像, 李强等 (2019) 利用面向对象方法提取了滑坡体的空间分布, 并基于人机交互的方式获取了损毁道路的分布信息, 分析结果如图5所示。面向对象分析方法能有效地提高震害目标的提取精度, 但是在对象分割、对象特征集构建时, 需要使用者具有较强的专家经验, 宏观性较强。

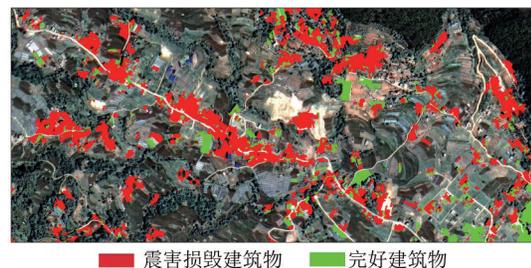


图4 基于面向对象分类的尼泊尔地震震害建筑物分布
Fig. 4 Distribution of earthquake damaged buildings in Nepal based on object-oriented classification

基于此, Zahraee 等 (2017) 将面向对象分类方法与变化检测方法相结合, 构建了面向对象变化检测技术流程, 有效地提高了信息提取的精度。

(4) 深度学习方法。将人工判读过程中训练样本选取的知识定量化表达, 并结合计算机图像处理, 可转变为知识驱动的信息自动化识别方法 (Goodenough 等, 1987; Mathieu 等, 1996; Stefanov 等, 2001; Suchenwirth 等, 2012; Forestier 等, 2012), 其中研究较多的为深度学习方法, 该方法是基于选取的标准样本库, 自主学习样本特征, 构建特征集, 基于特征集实现信息的自动提取

(张文元等, 2007; 周成虎等, 1996; 陈静波等, 2013)。基于深度学习的震害信息识别方法提取精度高、效果好, 但该类方法依赖样本的特征学习程度, 同样也受分类单元的影响。近年来, 发展了基于对象的深度学习, 将面向对象的思想引入到深度学习中, 有效地提高了分类学习的准确性与效率。随着大数据与人工智能技术的快速发展, 基于深度学习的灾情智能化识别技术将成为未来地震应急灾情调查的主要技术手段。

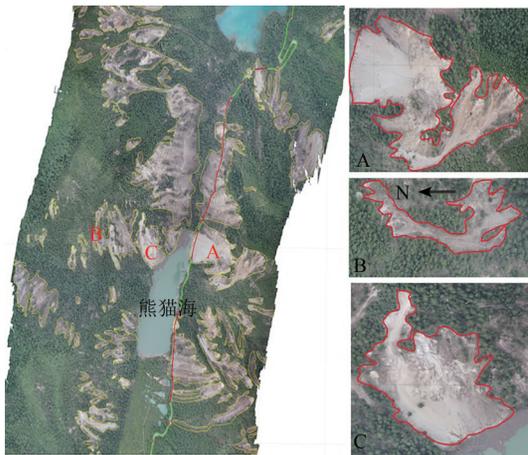


图5 基于面向对象提取方法的九寨沟地震次生灾害分布
Fig.5 Distribution of secondary disasters of Jiuzhaigou earthquake based on object-oriented extraction method

3.1.2 SAR 图像

震后通常会伴随阴雨等恶劣天气环境, 光学影像通常难以有效成像, 此时, 雷达遥感可发挥全天时、全天候的特征优势(金鼎坚, 2012)。早期, SAR 图像空间分辨率较低, 地震前后多时相变化检测方法是信息提取的主要方法, 但是随着图像空间分辨率的提升以及极化方式的丰富, 基于震后单时相 SAR 图像的震害信息提取研究越来越多(Wang and Jin, 2012)。

(1) 单极化 SAR 图像信息提取方法。SAR 图像初期空间分辨率较低, Matsuoka 和 Yamazaki (2004a) 统计分析了完好建筑物与倒塌建筑物在 SAR 图像中的特征与表现形态, 便于后续选取有效的特征对特征进行分类。Stramondo 等 (2008) 利用 COSMOS-SkyMed 图像检验了 SAR 图像在震后应急阶段提取震害信息精细程度与能力, 发现基于 COSMOS-SkyMed 数据在震后可区分基本完好与倒塌的建筑物信息, 但是无法判定更加详

细的震害等级。Matsuoka 和 Yamazaki (2004b) 以 Radarsat、Envisat 和 ERS-2 SAR 影像为数据源分别提取了震害建筑物信息, 对比分析了不同空间分辨率对信息提取精度的影响; 之后, 主要利用 SAR 图像的一些特征, 如纹理特征, 相干性等特征 (Stramondo 等, 2006), 通过特征的差异实现震害信息的提取; Dell'Acqua 等 (2011) 以街区为单位, 发现平均纹理特征与街区的破坏情况存在关系, 基于此, 利用平均纹理特征的变化实现了震害信息的提取; 李强 (2018) 以 2020 年 1 月 12 日海地地震震后的高分辨率 TerraSAR 图像为数据源, 采用卷积神经网络深度学习的方法, 获取了不同震害程度建筑物的空间分布信息, 与实地调查结果相比, 提取精度为 70% 左右, 与基于光学影像的震害提取结果相比, 该方法提取精度低, 且容易受斑点噪声影像, 造成分类结果碎斑点较多。

(2) 多极化 SAR 图像信息提取方法。相比于单极化 SAR 图像, 多极化图像含有更为丰富的图像特征(翟玮, 2016)。Sato 等 (2007) 分解获取 Pi-SAR SAR 图像垂直向、水平向、左旋、右旋参量, 通过计算参量的相关系数实现震害建筑物的提取; 郭华东等 (2010) 在玉树地震发生后, 以 ALOS-PALSAR 数据和 RADARSAT-2 数据为数据源, 对玉树地震结古镇震害建筑物分布进行了提取与分析, 发现极化 SAR 图像可在震害信息识别中发挥重要的作用; 之后, 相关学者围绕着极化特征与纹理特征的综合应用, 在震害信息提取领域产出了一系列成果 (Zhang 等, 2015; Zhai 等, 2016; 薛腾飞, 2017)。

3.1.3 LiDAR 图像

基于 LiDAR 图像的信息提取方法主要是利用其回波信息, 按照搭载平台分类可分为机载 LiDAR 和地基 LiDAR。窦爱霞等 (2013) 以海地地震机载 LiDAR 数据和高分辨率光学遥感影像数据为数据源, 将两类数据进行融合, 实现了完好建筑物与损毁建筑物的识别。地基 LiDAR 通常用于单体建筑物的详细勘察, 较难用于群体震害信息的识别。可在震后三维场景构建中发挥作用(袁小祥等, 2012; 童礼华等, 2013); 李强等 (2016) 利用课题组扫描获取的北川县城震后

LiDAR点云数据,综合利用回波、高程、纹理等特征,结合面向对象分析方法,实现震害建筑物信息的高精度提取。

3.2 基于多时相遥感图像的震害信息提取

多时相遥感图像信息提取核心的技术方法是变化检测方法,图像变化检测是遥感图像信息提取重要的研究方向(Rensink, 2002; Ridd和Liu, 1998),在灾害动态监测、灾情评估方面已发挥了重要的作用(Ridd和Liu, 1998; Anders等, 2013)。

3.2.1 光学图像

(1) 基于代数运算的图像变化检测。基于代数运算的方法是变化检测中最简单、最基本的一类方法。在震害信息提取方面,主要是利用影像的灰度特征,通过设置灰度差异阈值,实现震害建筑物的提取(Gamba和Casati, 1998; Yusuf, 2001; Ishii等, 2002)。

针对输入遥感图像的不同,相关学者也对变化检测信息提取精度影响因素,如图像的空间分辨率等开展了相关研究(Sakamoto等, 2004; Kohiyama和Yamazaki, 2005);龚丽霞等(2013)以2010年4月14日的玉树地震震后Quickbird遥感影像为数据源,采用差值法变化检测的方法,提取了玉树地震结古镇的震害建筑物分布信息,与目视解译结果相比,提取精度达60%左右,震后大量的建筑物倒塌,形成建筑废墟,从而导致错分。

除灰度特征外,相关学者也尝试引入不同的特征进行计算,如纹理特征,相关结果表明,纹理特征参与运算,信息识别精度总体比灰度特征高(Tomowski等, 2010; Miura等, 2012)。

(2) 分类后比较法。分类后变化检测是将图像分类与变化检测方法相结合而产生的一类方法。该方法在最初提取之前,是分别先将图像进行分类,之后对分类图像进行变化检测,方法的发展伴随着分类技术而发展,如与面向对象分析方法结合形成面向对象变化检测方法(Bitelli等, 2004)、与多特征分类方法结合形成多特征变化检测方法(Li等, 2009)。现阶段随着深度学习的发展,基于深度学习的变化检测可不用对图像进行分别分类,而直接实现差异区域的提取与识别

(王昶等, 2020)。Gamba等(2007)基于震后的遥感图像,分别提取地震前后遥感图像中的植被指数特征与建筑物线性特征,基于两类特征参量对比分析地震前后的差异,实现震害建筑物提取;龚丽霞等(2013)以玉树地震Quickbird遥感影像为数据源,采用面向对象与变化检测相结合的方法,首先采用面向对象对影像进行分类,然后采用变化检测方法获取震害建筑物信息,与目视解译结果相比,提取精度为85%左右,提取精度显著高于基于代数的变化检测方法,但是该方法受分类精度的影响,因此,需要对地震前后的遥感图像进行细致的分类方能获取较好的检测结果。

3.2.2 SAR图像

上述的光学图像变化检测方法在SAR图像中也同样适用,采用的特征为SAR图像的特征,通常这类变化检测方法分为图像预处理(滤波处理)、差异图像获取和分类(Tzeng等, 2007)。除了强度外,其对高度敏感的特征也可用于检测震害信息,如纹理特征、相位信息以及两者结合的特征信息(张艳梅, 2012)。

(1) 基于强度信息的变化检测方法。基于SAR图像强度信息的变化检测方法主要是通过计算强度相关性来实现差异图像的获取,Matsuoka和Yamazaki(2004a)通过分析地震前后SAR图像震损区域的强度相关性,发现建筑物破坏越严重,强度相关系数越小,由此提出了基于强度相关性计算的变化检测方法。Matsuoka和Yamazaki(2006)基于ALOS/PALSAR,构建了强度图像相关系数时间序列,基于相关系数时间序列实现震害信息的提取。Chini等(2008和2011)将地震前后SAR图像的后向散射系数差与相关系数进行结合实现震害信息的提取。Guida等(2010)分析了地震前后建筑物二次散射特质的变化,基于变化信息实现震害区域的识别。薛腾飞等(2016)将地震前后SAR图像的相关系数面向对象分析的特征参与震害建筑物信息的提取,较高精度地实现了熊本地震震害建筑物的识别。Li等(2019)利用拉奎拉地震COSMO-SkyMed影像,采用基于强度图像相关性变化检测的方法提取了不同震害程度建筑物信息,提取结果如图6所示,与实地调查结果相比,提取精度达75%以上。

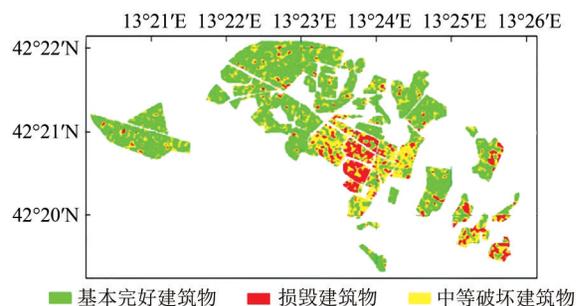


图6 基于相关性变化检测的拉奎拉地震震害建筑物提取结果

Fig.6 Extraction results of buildings damaged by L' Aquila earthquake based on correlation change detection

(2) 相位变化检测技术方法。相位信息也包含丰富的有用信息, 可用于变化检测的输入参量(薛腾飞, 2017)。Ito等(2000)分析了地震前后SAR图像震害区域与相干变化间的关系, 发现破坏越严重, 其相干性越小, 由此提出了基于SAR图像相干性的变化检测方法。Matsuoka和Yamazaki(2000)也利用Kocaeli地震前后ERS/SAR数据证实了震害区域与相干性存在一定的关系, 由此, 相关学者在一系列地震中广泛应用该方法(Yonezawa和Takeuchi, 2001; Hoffmann, 2007; 刘云华等, 2010)。日本熊本地震发生之后, 日本宇宙航空研究开发机构JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)利用获取的地震前后的ALOS-2数据, 采用相干性变化检测的方法提取了震区不同震害程度的建筑物信息(游志斌, 2016)。但是SAR图像相干性变化检测方法存在一个问题, 即造成SAR图像失相干的因素较多, 如何有效地剔除其余因素而保留建筑物损毁信息是变化检测中需要重点考虑的问题(李强等, 2017)。

除此, Yonezawa等(2002)综合考虑相关性与相干性, 将两类特征进行融合实现震害信息的提取。Arciniegas等(2007)分析了震害程度大小与相干性与相位变化间的关系, 发现, 震害程度越大, 相干系数越小, 而与相位信息没有明显的线性关系。李强等(2018)利用SAR图像的纹理特征进行变化检测, 将多纹理特征进行综合, 提出了多纹理特征主成分分量变化检测方法, 成功提取了熊本地震的震害建筑物信息。

随着SAR图像空间分辨率的提升与图像处理技术的发展, SAR图像中可利用的特征越来越丰富, 因此基于SAR图像的变化检测方法也会越来越多。

3.3 存在的问题

地震灾害具有区域性与复杂性等特点, 实现地震灾害遥感的快速应急需要解决不同资源的管理、卫星资源统筹规划、组织体制机制、响应模式等问题, 本文重点关注遥感数据快速处理、专题信息智能化提取等关键技术, 具体来看, 存在的问题主要表现在以下几个方面:

(1) 海量数据处理效率不满足地震应急需求。随着中国遥感技术的不断发展, 在轨运行或即将发射的卫星数量激增, 预计到2020年, 在轨运行的卫星数量达到80颗(眭海刚, 2013), 震后可获取海量的灾区灾情数据, 一般的服务器难以满足灾后海量数据快速处理计算的需求。震后需要快速地对影像进行处理获取灾情的分布信息, 因此, 数据处理与分析的效率一定程度上决定了应急决策制定的效果。现阶段, 卫星可实现快速的下传, 但是传输到用户手中的时间、地面的处理能力、信息的自动化处理水平、智能化程度还难以满足地震应急时效性的需求。

(2) 地震灾情智能化识别尚不能满足应急时效性与精准性的需求。现阶段, 灾后获取遥感图像后, 灾情获取的首要手段仍然是人工目视解译, 人工目视解译依赖于人类高级智能, 很大程度上依赖解译标志与经验知识, 难以在大空间尺度范围发挥有效的作用(郭华东等, 2009)。基于计算机分类的方法虽然在技术上得到不断的改进, 但是算法改进对于精度、效率的贡献比数据与样本的贡献小, 在图像分类方法上, 数字图像的分类信息识别主要以像元为单位, 分类过程中易受到斑噪的影响。目前虽然提出了面向对象的信息提取与方法, 实现了对象层-目标层的震害信息识别与提取, 完成了像元层到对象层的过渡, 但是在分割与知识规则集构建过程中, 阈值的选取与特征规则的构建均需要人为的不断尝试与试验, 方法不具有普适性, 且不能实现基于高层语义与场景知识的信息自动化识别。

(3) 多源异构数据协同分析能力不足, 致使影像信息利用程度不高。遥感技术的发展使得震后短时间内可获取海量的多模式的遥感影像数据, 采用同源的多时相遥图像开展灾情的动态监测(张景发等, 2002)。震后获取的遥感影像数据呈现中/高分辨率, 多光谱/高光谱/SAR图像并存的局

面,为震害信息的快速识别提供了数据支撑(眭海刚等,2018)。常规的变化检测方法通常仅利用同源的遥感图像,对数据获取角度、成像条件要求比较高,在时效性上难以满足地震应急的需求。灾后,获取的遥感影像类型多样,不同时相遥感图像对比分析可提高由单一传感器到多传感器的协同分析成为提高灾后信息获取能力的重要手段。

4 遥感地震应急关键技术应用趋势

随着高空间分辨率、高时间分辨率、高光谱分辨率遥感卫星的不断发生发射,天空地一体化协同技术的快速发展(邵芸等,2016),震后获取的遥感数据逐渐呈现出“大数据”的特征。在实际应急工作中,我们认为遥感技术成熟的应用于地震应急调查还需要在以下几点关键技术方面进行探索,从而构建未来卫星遥感实时应急响应新的模式。

(1) 基于深度学习的灾情智能化识别。地震后不缺乏信息,而是缺乏对应急救援有用的信息。面对海量遥感图像所包含的丰富的信息,借鉴人工神经网络深度学习技术,将人工目视解译依赖的高级智能知识与图像特征转换为计算机可识别的高级语义信息,需要充分挖掘图像中的特征知识,实现遥感数据-知识-震害地物目标的转化,解决传统数据分析方法中特征表达不全的难题,实现震害信息智能化和自动化提取,这是未来震害信息识别领域需要重点关注的问题。

(2) 基于数据同化的多源数据协同分析。不同类型、不同源遥感数据中涵盖的信息不同,协同多源异构遥感影像数据能有效地发挥不同模式遥感影像的作用,提高信息识别的准确度(徐敬海等,2010;李强,2018)。因此,发展数据同化技术,基于多源异构数据采用对象级深度学习与变化检测相结合的方法开展地震应急监测、震害评估是遥感图像信息分析中的难题也是遥感地震应急的必然趋势。

(3) 基于云平台的海量数据快速处理。遥感地震应急时效性的提升需要海量数据的高性能计算,现阶段,超性能计算的应用可快速地提高数据的处理能力,通过搭建海量时空数据软硬件一体化高性能计算平台,构建集群与并行计算,实现计算资源的最优化,同时结合云存储与云计算技术,提升数据的处理效率。未来基于云平台的

海量数据在线实时处理和分析将成为遥感震害调查领域的重要发展方向。

(4) 星上数据在轨实时处理技术。现阶段,影响遥感地震应急时效性的因素除了数据处理效率外,星地传输链路也极大影响了应急时效性(胡国军等,2009)。针对卫星影像数据量大,星上数据存储、处理与传输能力受限的问题,发展重特大灾害卫星数据在轨实时处理技术,实现典型震害目标信息的在轨智能识别与评估,可提高地震应急的时效性和卫星的智能性能。

(5) 发展大幅宽、高时间分辨率、高空间分辨率一体化的遥感卫星。重特大地震影响范围通常较大,如2008年汶川大地震重灾区面积超过10万 km^2 ,需要多颗遥感卫星连续成像方能覆盖灾区,甚至由于卫星过境时间的影响,造成灾区存在空白区域,影响地震灾情的有效判断(王赛,2015)。中国正在研究时间分辨率高的高轨SAR雷达卫星,该卫星具有较高的时间分辨率,能在地震发生后短时间内快速成像,但是其空间分辨率较低,一定程度上影响了灾情的快速评估与应急能力。因此需要发展覆盖范围广、时间分辨率高且空间分辨率高的遥感卫星数据,如RADARSAT-2卫星的超宽精细模式(分辨率5 m,幅宽125 km),兼具幅宽广和分辨率高,满足重特大地震应急的需求。

5 结语

多次的重特大地震应急工作证明,遥感技术在应急工作中可发挥重要的作用,结合参与多次遥感地震应急实际工作的经验,系统的总结了光学、雷达以及LiDAR技术在地震应急调查中的应用现状,尤其是在震害信息提取中的应用,以是否输入震前影像为分类依据,分为震后单时相影像的信息分析方法和地震前后多时相影像的变化检测方法,概括说明了每类方法应用情况。

高分辨率光学遥感图像在震害信息识别中,通常仅利用其光谱特征,忽略了空间分布特征、几何特征的应用。基于传统像元的分类方法容易分类结果中含有椒盐效应,因此需要在此基础上发展以对象为单元的多特征知识驱动的分类技术,因此面向对象分析与知识集成结合的方法将成为未来震害灾情提取与评估的主流方法。对于SAR图像而言,单时相SAR图像震害评估主要集中于

以街区为单位的平均震害评估,对于单体建筑物的成像机理、特征表现及信息提取研究较少。震后震害地物目标复杂多样,要完全实现基于遥感图像的震害目标全自动化提取,尚需算法的不断改进与发展。

传统的变化检测方法主要针对于同类型传感器,不同源遥感影像数据的有效结合与交互利用也是未来的发展趋势。不同震害程度的震害目标在遥感影像中表现的特征信息也有所差异,基于特征的变化检测方法能充分地利用图像的特征信息,能有有效地提高震害识别精度,因此多时相图像变化检测的重点是空间特征在对象层面变化检测的有效应用。

以实际地震为例,阐述了遥感技术在应急中的应用情况,并针对性的提出了现阶段遥感地震应急存在的海量数据处理效率不高、信息识别自动化与智能化程度低、多源异构数据协同能力弱等问题,针对此,从深度学习技术发展、多源数据协同处理、云平台技术应用、卫星数据在轨实时处理、新遥感卫星发展等几个方面阐述了遥感地震应急调查应用未来发展趋势。

参考文献(References)

- Anders N S, Seijmonsbergen A C and Bouten W. 2013. Geomorphological change detection using object-based feature extraction from multi-temporal LiDAR data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(6): 1587-1591 [DOI: 10.1109/LGRS. 2013. 2262317]
- Arciniegas G A, Bijker W, Kerle N and Tolpekin V A. 2007. Coherence- and amplitude-based analysis of seismogenic damage in Bam, Iran, using ENVISAT ASAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(6): 1571-1581 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.883149]
- Baatz M and Schäpe A. 1999. Object-oriented and Multi-scale image analysis in Semantic networks//Proceedings of the 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing. Enschede, ITC, AUG: 87-109
- Bitelli G, Camassi R, Gusella L and Mogno A. 2004. Image change detection on urban areas: the earthquake case//Proceedings of the 20th International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Istanbul, Turkey, 7(12): 692-697
- Blaschke T. 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(1): 2-16 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004]
- Chen J B, Liu S X, Wang C Y, You S C and Wang Z W. 2013. Research on urban water body extraction using knowledge-based decision tree. *Remote Sensing Information*, 28(1): 29-33, 37 (陈静波, 刘顺喜, 汪承义, 尤淑撑, 王忠武. 2013. 基于知识决策树的都市水体提取方法研究. *遥感信息*, 28(1): 29-33, 37) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.01.007]
- Chen L Z, Shen X H, Wang H, Hong S Y and Jing F. 2016. Application of high-resolution remote sensing technique to earthquake studies in China. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 333-344 (陈立泽, 申旭辉, 王辉, 洪顺英, 荆凤. 2016. 我国高分辨率遥感技术在地震研究中的应用. *地震学报*, 38(3): 333-344) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.002]
- Chen Q H. 2007. Research and realization of multi-sources remote sensing data on object oriented. Wuhan: China University of Geosciences (陈启浩. 2007. 面向对象的多源遥感数据分类技术研究及实现. 武汉: 中国地质大学)
- Chen R, Guo X Y, Du J and Hu X. 2020. Monitoring of disturbance on ecological environment caused by earthquake and post-disaster reconstruction at Heye Village area of Jiuzhaigou using the high-resolution remote sensing imageries. *Quaternary Sciences*, 40(5): 1350-1358 (陈润, 郭忻怡, 杜杰, 胡晓. 2020. 地震地质灾害及灾后重建对九寨沟荷叶寨区域生态环境扰动的遥感监测. *第四纪研究*, 40(5): 1350-1358) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2020.05.22]
- Chen W F, Guo H M and Zhang Y. 2014. Fast acquisition and analytical processing system of earthquake disaster information in Sichuan Province. *Journal of Catastrophology*, 29(2): 116-122 (陈维锋, 郭红梅, 张翼. 2014. 四川省地震灾情快速上报接收处理系统. *灾害学*, 29(2): 116-122) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.02.023]
- Chen X L and Xie G L. Quick evaluation and decision making for earthquake disaster by airborne remote sensing. *Journal of Natural Disasters*, 5(3): 29-34 (陈鑫连, 谢广林. 1996. 航空遥感的震害快速评估与救灾决策. *自然灾害学报*, 5(3): 29-34)
- Chini M, Bignami C, Stramondo S and Pierdicca N. 2008. Uplift and subsidence due to the 26 December 2004 Indonesian earthquake detected by SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13): 3891-3910 [DOI: 10.1080/01431160701871112]
- Chini M, Cinti F R and Stramondo S. 2011. Co-seismic surface effects from very high resolution panchromatic images: the case of the 2005 Kashmir (Pakistan) earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(3): 931-943 [DOI: 10.5194/nhess-11-931-2011]
- Dell'Acqua F, Bignami C, Chini M, Lisini G, Polli D A and Stramondo S. 2011. Earthquake damages rapid mapping by satellite remote sensing data: L'Aquila April 6th, 2009 event. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 4(4): 935-943 [DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2162721]
- Dekker R J. 2011. High-resolution radar damage assessment after the earthquake in Haiti on 12 January 2010. *IEEE Journal of Selected*

- Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 4(4): 960-970.[DOI:10.1109/JSTARS.2011.2164516]
- Dong L G and Shan J. 2013. A comprehensive review of earthquake-induced building damage detection with remote sensing techniques. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 84: 85-99 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.06.011]
- Dou A X, Ma Z J, Huang W L, Wang X Q and Yuan X X. 2013. Automatic identification approach of building damages caused by earthquake based on airborne LiDAR and multispectral imagery. Remote Sensing Information, 28(4): 103-109 (窦爱霞, 马宗晋, 黄文丽, 王晓青, 袁小祥. 2013. 基于机载LiDAR和多光谱图像的建筑物震害自动识别方法. 遥感信息, 28(4): 103-109) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2013.04.018]
- Editorial Department of Satellite Application. 2014. The application of remote sensing develops in depth. Satellite Application, (6): 1 (《卫星应用》编辑部. 2014. 遥感应用向纵深发展. 卫星应用, (6): 1)
- Fan Y D and Wu W. 2016. The successful launch of "Gaofen-4" has helped the cause of disaster prevention and mitigation. Disaster Reduction in China, (2):48-49 (范一大, 吴玮. 2016. "高分四号"发射成功助力防灾减灾事业. 中国减灾, (2):48-49) [DOI: 10.3969/j.issn.1002-4549.2016.03.010]
- Forestier G, Puissant A, Wemmert C and Gançarski P. 2012. Knowledge-based region labeling for remote sensing image interpretation. Computers, Environment and Urban Systems, 36(5): 470-480 [DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2012.01.003]
- Gamba P and Casciati F. 1998. GIS and image understanding for near-real-time earthquake damage assessment: remote sensing and GIS for hazards. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 64(10): 987-994[DOI:10.1117/1.482668]
- Gamba P, Dell'Acqua F and Odasso L. 2007. Object-oriented building damage analysis in VHR optical satellite images of the 2004 tsunami over Kalutara, Sri Lanka//2007 Urban Remote Sensing Joint Event. Paris: IEEE: 1-5 [DOI: 10.1109/URS.2007.371787]
- Gong L X, Li Q, Zhang J F, Zeng Q M, Liu M Z and Li C L. 2013. Object-oriented detection of earthquake building damages. Earthquake, 33(2): 109-114 (龚丽霞, 李强, 张景发, 曾琪明, 刘明众, 李成龙. 2013. 面向对象的房屋震害变化检测方法. 地震, 33(2): 109-114) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.014]
- Goodenough D G, Goldberg M, Plunkett G and Zelek J. 1987. An expert system for remote sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, GE-25(3): 349-359 [DOI: 10.1109/TGRS.1987.289805]
- Grant L B, Mueller K J, Gath E M, Cheng H, Edwards R L, Munro R and Kennedy G L. 1999. Late Quaternary uplift and earthquake potential of the San Joaquin Hills, Southern Los Angeles Basin, California. Geology, 27(11): 1031-1034 [DOI: 10.1130/0091-7613(1999)027<1031:LQUAEP>2.3.CO;2]
- Guida R, Iodice A and Riccio D. 2010. Monitoring of collapsed built-up areas with high resolution SAR images//2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE: 2422-2425 [DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5650083]
- Guo H D, Liu L Y and Fan X T. 2011. Study of earth observation for disaster reduction in Wenchuan and Yushu earthquakes. Geological Journal of China Universities, 17(1): 12 (郭华东, 刘良云, 范湘涛. 2011. 对地观测技术用于汶川和玉树地震灾害的研究. 高校地质学报, 17(1):12) [DOI:10.3969/j.issn.1006-7493.2011.01.001]
- Guo H D, Lu L L and Ma J W. 2009. An improved automatic detection method for earthquake-collapsed buildings from ADS40 image. Chinese Science Bulletin, 54(17): 2581-2585: 3303-3307 (郭华东, 鹿琳琳, 马建文. 2009. 一种改进的地震灾害倒塌房屋遥感信息自动识别方法. 科学通报, 54(17): 2581-2585) [DOI: 10.1007/s11434-009-0461-3]
- Guo H D, Wang X Y, Li X W, Liu G, Zhang L and Yan S Y. 2010. Yushu earthquake synergic analysis using multimodal SAR datasets. Chinese Science Bulletin, 55(31): 3499-3503 (郭华东, 王心源, 李新武, 刘广, 张露, 阎世勇. 2010. 多模式SAR玉树地震协同分析. 科学通报, 55(13): 1195-1199) [DOI: 10.1007/s11434-010-0292-2]
- Hagi T and Sun Y H. 1988. Earthquake and city. Recent Developments in World Seismology, (7): 39-40 (萩原尊礼, 孙永华. 1988. 地震与城市. 国际地震动态, (7): 39-40) [DOI: CNKI:SUN:GJZT.0.1988-07-013]
- Hoffmann J. 2007. Mapping damage during the Bam (Iran) earthquake using interferometric coherence. International Journal of Remote Sensing, 28(6): 1199-1216 [DOI: 10.1080/01431160600928567]
- Hu G J, Li S Z and Hu H Y. 2009. A data transmission system of earth observation satellite and the design of satellite earth link. Remote Sensing Information, 1:66-69,74 (胡国军, 李世忠, 胡海彦. 2009. 一种对地观测卫星的数据传输系统及星地链路设计. 遥感信息, 1: 66-69,74) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2009.01.013]
- Huyck C K, Adams B J, Cho S, Chung H C and Eguchi R T. 2005. Towards rapid citywide damage mapping using neighborhood edge dissimilarities in very high-resolution optical satellite imagery—application to the 2003 Bam, Iran, earthquake. Earthquake Spectra, 21(S1): 255-266 [DOI: 10.1193/1.2101907]
- Ishii M, Goto T, Sugiyama T, Saji H and Abe K. 2002. Detection of earthquake damaged areas from aerial photographs by using color and edge information//Proceedings of the 5th Asian Conference on Computer Vision. Melbourne, Australia: 23-25
- Ito Y, Hosokawa M, Lee H and Liu J G. 2000. Extraction of damaged regions using SAR data and neural networks//Proceeding of 19th International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS) Conference. Amsterdam: 156-163
- Jin D J. 2012. Methods of extracting building damage from high resolution SAR image. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting (金鼎坚. 2012. 高分辨率SAR影像建筑物震害信息提取方法研究. 北京: 中国地震局地震预测研究所)
- Kohiyama M and Yamazaki F. 2005. Damage detection for 2003 Bam, Iran, earthquake using Terra-ASTER satellite imagery. Earthquake Spectra, 21(S1): 267-274 [DOI: 10.1193/1.2098947]
- Li D R. 2009. Intelligent earth observation systems and earthquake relief. Science of Surveying and Mapping, 34(1): 8-10 (李德仁.)

2009. 对地观测与抗震救灾. 测绘科学, 34(1): 8-10 [DOI: 10.3771/j.issn.1009-2307.2009.01.001]
- Li D R, Wang M, Shen X and Dong Z P. 2017. From earth observation satellite to earth observation brain. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 42(2): 143-149 (李德仁, 王密, 沈欣, 董志鹏. 2017. 从对地观测卫星到对地观测脑. 武汉大学学报(信息科学版), 42(2): 143-149) [DOI: 10.13203/j.whugis.20160526]
- Li P J, Xu H Q, Liu S A and Guo J C. 2009. Urban building damage detection from very high resolution imagery using one-class SVM and spatial relations//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE: V-112-V-114 [DOI: 10.1109/IGARSS.2009.5417719]
- Li Q, Zhang J F, Gong L X, Xue T F and Jiang H B. 2018. Extraction of earthquake-collapsed buildings based on correlation change detection of multi-texture features in SAR images. *Journal of Remote Sensing*, 22(S1): 128-138 (李强, 张景发, 龚丽霞, 薛腾飞, 蒋洪波. 2018. SAR 图像纹理特征相关变化检测的震害建筑物提取. 遥感学报, 22(S1): 128-138) [DOI: 10.11834/jrs.20187185]
- Li Q. 2018. Study on key technology of earthquake emergency using multi-mode remote sensing data. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (李强. 2018. 多模式遥感数据地震应急关键技术研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Li Q, Zhang J F and Luo Y. 2019. Recognition of earthquake-induced landslide and spatial distribution patterns triggered by the Jiuzhaigou earthquake in August 8, 2017. *JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 23(4):11 (李强, 张景发, 罗毅. 2019. 2017年"8.8"九寨沟地震滑坡自动识别与空间分布特征. 遥感学报, 2019, 23(4): 11) [DOI:10.11834/jrs.20197345]
- Li Q, Gong L X and Zhang J F. 2019. A correlation change detection method integrating PCA and multi-texture features of SAR image for building damage detection. *European Journal of Remote Sensing*, 52(1): 435-447 [DOI: 10.1080/22797254.2019.1630322]
- Li Q, Jiao Q S and Zhang J F. 2016. Research on building extraction of earthquake damage of ground LiDAR point cloud based on object-oriented. *Science Technology and Engineering*, 16(19): 244-249 (李强, 焦其松, 张景发. 2016. 基于地面激光雷达技术点云的北川县城震害建筑物提取研究. 科学技术与工程, 16(19): 244-249) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.19.042]
- Li Q and Zhang J F. 2013. Extraction of building information from high resolution images based on CART decision tree. *Earthquake*, 33(2): 96-102 (李强, 张景发. 2013. 基于CART决策树提取高分辨率遥感影像建筑物信息. 地震, 33(2): 96-102) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.012]
- Li S J and Liu M. 2018. Application of satellite remote sensing in emergency monitoring of major earthquake disaster in China. *City and Disaster Reduction*, (4): 7-10 (李素菊, 刘明. 2018. 卫星遥感在我国重大地震灾害应急监测中的应用. 城市与减灾, (4): 7-10) [DOI: CNKI:SUN:CSJZ.0.2018-04-003]
- Liu J H. 2003. A method study on automatic recognition and classification of earthquake-caused building damage in cities using remote Sensing. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administrator (柳稼航. 2003. 利用遥感技术进行城市建筑物震害的自动识别与分类方法研究. 北京: 中国地震局地质研究所)
- Liu Y H, Qu C Y, Shan X J, Song X G, Zhang G F and Zhang G H. 2010. Application of SAR data to damage identification of the Wenchuan earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 32(2): 214-223 (刘云华, 屈春燕, 单新建, 宋小刚, 张桂芳, 张国宏. 2010. SAR 遥感图像在汶川地震灾害识别中的应用. 地震学报, 32(2): 214-223) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-3782.2010.02.009]
- Mathieu B, Oustaloup A and Lanusse P. 1996. Third generation CRONE control: generalized template and curvilinear template//Symposium on Control Optimization and Supervision. IEEE, Lille: 149-155.
- Matsuoka M and Yamazaki F. 2000. Use of interferometric satellite SAR for earthquake damage detection//Proceedings of 6th International Conference on Seismic Zonation. Earthquake Engineering Research Institute: 103-108
- Matsuoka M and Yamazaki F. 2004a. Use of SAR intensity imagery for earthquake damage detection//Proceedings of the 2nd International Workshop on Remote Sensing for post-Disaster Response. Newport Beach: IEEE: 7-8
- Matsuoka M and Yamazaki F. 2004b. Use of satellite SAR intensity imagery for detecting building areas damaged due to earthquakes. *Earthquake Spectra*, 20(3): 975-994 [DOI: 10.1193/1.1774182]
- Matsuoka M and Yamazaki F. 2006. Use of SAR imagery for monitoring areas damaged due to the 2006 Mid Java, Indonesia Earthquake//Proceedings of 4th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Response. Cambridge, UK: 25-26
- Miao L T. 1990. Research on earthquake emergency work. *Recent Developments in World Seismology*, (11): 34-37 (苗良田. 1990. 关于地震应急工作的研究. 国际地震动态, (11): 34-37)
- Mitomi H, Yamazaki F and Matsuoka M. 2001. Development of automated extraction method for building damage area based on maximum likelihood classifier//Proceedings of the 8th International Conference on Structural Safety and Reliability. California: Newport Beach, CA(US), Swets & Zeitling: 2430-2442
- Miura H, Modorikawa S and Chen S H. 2012. Texture analysis of high-resolution satellite images for damage detection in the 2010. Haiti Earthquake. *Journal of Jaee*, 12(6): 2-20 [DOI: 10.5610/jaee.12.6_2]
- Nie G Z, An J W and Deng Y. 2012. Advances in earthquake emergency disaster service. *Seismology and Geology*, 34(4): 782-791 (聂高众, 安基文, 邓砚. 2012. 地震应急灾情服务进展. 地震地质, 34(4): 782-791) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2012.04.020]
- Peng L, Xu S N, Mei J J and Su F H. 2017. Earthquake-induced landslide recognition using high-resolution remote sensing images. *Journal of Remote Sensing*, 21(4): 509-518 (彭令, 徐素宁, 梅建军, 苏凤环. 2017. 地震滑坡高分辨率遥感影像识别. 遥感学报, 21(4): 509-518) [DOI: 10.11834/jrs.20176176]
- Rathje E M, Woo K S, Crawford M and Neuenschwander A. 2005. Earthquake damage identification using multi-temporal high-reso-

- lution optical satellite imagery//Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul: IEEE: 5045-5048 [DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1526812]
- Rensink R A. 2002. Change detection. *Annual Review of Psychology*, 53: 245-277 [DOI: 10.1146/annurev.psych.53.100901.135125]
- Ren F. 2017. Research on earthquake disaster assessment based on satellite remote sensing technology. *Technical Information*, 15(19): 8-10 (任峰. 2017. 基于卫星遥感技术的地震灾害评估研究. 科技资讯, (19): 8-10)[DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2017.19.008]
- Ridd M K and Liu J J. 1998. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment*, 63(2): 95-100 [DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00112-0]
- Sakamoto M, Takasago Y, Uto K, Kakumoto S, Kosugi Y and Doihara T. 2004. Automatic detection of damaged area of Iran earthquake by high-resolution satellite imagery//2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anchorage: IEEE: 1418-1421 [DOI: 10.1109/IGARSS.2004.1368685]
- Sato R, Soma K, Yajima Y, Yamaguchi Y and Yamada H. 2007. Classification of stricken residential houses by the Mid Niigata Prefecture Earthquake based on POLSAR image analysis//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 200-203 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4422764]
- Shao Y, Zhao Z M, Huang F X, Xiao Q, Wang Y X and Zhang F L. 2016. Precise emergency service system construction and demonstration through synergy observation of spaceborne, airborne, and ground remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 20(6): 1485-1490 (邵芸, 赵忠明, 黄富祥, 肖青, 王宇翔, 张凤丽. 2016. 空地协同遥感监测精准应急服务体系构建与示范. 遥感学报, 20(6): 1485-1490) [DOI: 10.11834/jrs.20166368]
- Stefanov W L, Ramsey M S and Christensen P R. 2001. Monitoring urban land cover change: an expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, 77(2): 173-185 [DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00204-8]
- Stramondo S, Bignami C, Chini M, Pierdicca N and Tertulliani A. 2006. Satellite radar and optical remote sensing for earthquake damage detection: results from different case studies. *International Journal of Remote Sensing*, 27(20): 4433-4447 [DOI: 10.1080/01431160600675895]
- Stramondo S, Chini M, Salvi S, Bignami C, Zoffoli S and Boschi E. 2008. Ground deformation imagery of the May Sichuan earthquake. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 89(37): 341-342 [DOI: 10.1029/2008EO370002]
- Suchenwirth L, Förster M, Cierjacks A, Lang F and Kleinschmit B. 2012. Knowledge-based classification of remote sensing data for the estimation of below- and above-ground organic carbon stocks in riparian forests. *Wetlands Ecology and Management*, 20(2): 151-163 [DOI: 10.1007/s11273-012-9252-8]
- Sui H G. 2013. On the challenge of real-time processing of remote sensing data in disaster emergency response. *Disaster Reduction in China*, 12(X): 28-29 (眭海刚. 2013. 论灾害应急响应遥感数据实时处理面临的挑战. 中国减灾, 12(X): 28-29)[DOI: CNKI: SUN:ZGJI.0.2013-24-011]
- Sui H G, Feng W Q, Li W Z, Sun K M and Xu C. 2018. Review of change detection methods for multi-temporal remote sensing imagery. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1885-1898. (眭海刚, 冯文卿, 李文卓, 孙开敏, 徐川. 2018. 多时相遥感影像变化检测方法综述. 武汉大学学报: 信息科学版, 43(12): 1885-1898., 43(12): 14) [DOI: 10.13203/j.whugis20180251]
- Tan Q Q, Liu Q and Wang Z Y. 2013. Rapid production technology of earthquake emergency thematic map based on high-resolution remote sensing image//Satellite Navigation and Positioning and Beidou System Application 2013—Beidou Brilliant China. China Satellite Navigation and Positioning Association; China Disaster Prevention Association (谭庆全, 刘群, 王占英. 2013. 基于高分辨率遥感影像的地震应急专题图快速制作技术//卫星导航定位与北斗系统应用2013——应用北斗 光彩中国. 中国卫星导航定位协会;中国灾害防御协会)
- Tomowski D, Klonus S, Ehlers M, Michel U and Reinartz P. 2010. Change visualization through a texture-based analysis approach for disaster applications//ISPRS Proceedings, Seiten 1-6. IS-PRSCOMMISSION VII Symposium. Vienna, Austria: 263-268
- Tong L H, Cheng L, Li M C, Chen Y M, Wang Y F and Zhang W. 2013. Extraction of building contours and corners from terrestrial LiDAR data. *Journal of Image and Graphics*, 18(7): 876-883 (童礼华, 程亮, 李满春, 陈焱明, 王亚飞, 张雯. 2013. 地面LiDAR数据中建筑轮廓和角点提取. 中国图象图形学报, 18(7): 876-883) [DOI: 10.11834/jig.20130718]
- Turker M and San B T. 2004. Detection of collapsed buildings caused by the 1999 Izmit, turkey earthquake through digital analysis of post-event aerial photographs. *International Journal of Remote Sensing*, 25(21): 4701-4714 [DOI: 10.1080/01431160410001709976]
- Tzeng Y C, Chiu S H, Chen D and Chen K S. 2007. Change detections from SAR images for damage estimation based on a spatial chaotic model//2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona: IEEE: 1926-1930 [DOI: 10.1109/IGARSS.2007.4423203]
- Vu T T, Matsuoka M and Yamazaki F. 2005. Preliminary results in development of an object-based image analysis method for earthquake damage assessment //3rd International Workshop on Remote Sensing for Post-Disaster Response. Chiba, Japan: 128
- Wang C, Zhang Y S, Wang X and Yu Y. 2020. Remote sensing image change detection method based on deep neural networks. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 54(11): 2138-2148 (王昶, 张永生, 王旭, 于英. 2020. 基于深度学习的遥感影像变化检测方法. 浙江大学学报(工学版)54(11): 2138-2148)[DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2020.11.009]

- Wang D X. 2016. The reform of disaster management system in Japan: in view of the aftermath of "March 11 East Japan earthquake. *Nankai Journal (Philosophy Literature and Social Science Edition)*, (6): 86-92 (王德迅. 2016. 日本灾害管理体制变革研究——以“3·11东日本大地震”为视角. *南开学报(哲学社会科学版)*, (6): 86-92)
- Wang L T, Wang S X and Zhou Y. 2010. Urgent monitoring and analysis on Yushu Earthquake using remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, (5):1053-1066 (王丽涛, 王世新, 周艺. 2010. 青海玉树地震灾情遥感应急监测分析. *遥感学报*, (5):1053-1066) [DOI: CNKI:SUN:YGXB.0.2010-05-018]
- Wang H L and Bai R Z. 1992. Monitoring ground temperature anomalies in earthquake areas with meteorological satellites: a case study of two earthquakes in Datong, Shanxi Province. *Remote Sensing Information*, (2):6-7 (王宏禄, 白锐峥. 用气象卫星监测地震区地温异常:以山西大同两次地震为例. *遥感信息*, 1992(2):6-7)
- Wang L. 1988. Discussion on regional crustal stability in Yingkou area from the structural interpretation of remote sensing images. *Land Resources*, (4):74-82 (王丽. 1988. 从遥感影像的构造解译讨论营口地区区域地壳稳定性. *国土资源*, (4):74-82)
- Wang M, Wang J, Jiang Y and Ma X B. 2010. The earthquake survey of geological hazards and spatial analysis in Wenchuan County. *Journal of Geo-information Science*, (4):480-486 (王猛, 王军, 江煜. 2010. 汶川地震地质灾害遥感调查与空间特征分析. *地球信息科学学报*, (4): 480-486) [DOI: CNKI: SUN: DQXX. 0.2010-04-007]
- Wang S. 2015. Research on Earthquake Induced Landsides Extraction from Multi-source Remote Sensing Data in the Wenchuan. *China University of Geosciences (Beijing)* (王赛. 2015. 基于多源遥感数据的汶川地震型滑坡信息提取研究. 北京: 中国地质大学(北京))
- Wang T L and Jin Y Q. 2012. Post-earthquake building damage assessment using multi-mutual information from pre-event optical image and postevent SAR image. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(3):452-456 [DOI:10.1109/LGRS.2011.2170657]
- Wang X Q, Dou A X and Wang L. 2015. RS-based assessment of seismic intensity of the 2013 Lushan, Sichuan, China M_s 7.0 earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(1): 163-171 (王晓青, 窦爱霞, 王龙. 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) [DOI: 10.6038/cjg20150114]
- Wang Y, Wang X Q, Dou A X, Sun S M and Fu C. 2012. Object-oriented remote sensing data classification method application in earthquake damage rapid extraction. *Recent Developments in World Seismology*. (6):1-5 (王岩, 王晓青, 窦爱霞. 2012. 面向对象遥感分类方法在震害快速提取中的应用. *国际地震动态*, (6):1-5) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4975.2012.06.288]
- Wang X Q, Dou A X, Sun G Q, Ding X, Wang L and Yuan X X. 2013. Intensity assessment of the 2010 Yushu M_s 7.1 earthquake based on synthetic seismic damage index. *Earthquake*, 33(2): 1-10 (王晓青, 窦爱霞, 孙国清, 丁香, 王龙, 袁小祥. 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) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2013.02.001]
- Wei Y M, Li J N, Chen Y and Gao J F. 2021. Research on optical remote sensing characteristics of coseismic surface rupture of different types of seismogenic faults. *Quaternary Sciences*, 41(6): 1513-1531 (魏永明, 李剑南, 陈玉, 高锦风. 2021. 不同类型发震断层的同震地表破裂光学遥感特征研究. *第四纪研究*, 41(6): 1513-1531) [DOI:10.11928/j.issn.1001-7410.2021.06.01]
- Wen X, Zhou B and Yan C H. 2014. Building damage detection based on object-oriented classification method—a case study in Yushu earthquake. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 35(5/6): 134-143 (文翔, 周斌, 阎春恒. 2014. 遥感分类方法在建筑物震害提取中的应用(以玉树地震为例). *地震地磁观测与研究*, 35(5/6): 134-143) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-3246.2014.05/06.025]
- Wu M C, Liu J and Cosgrove J. 2014. Modelling of Yingxiu - Beichuan fault zone based on refined DInSAR data of 2008 Wenchuan earthquake. *Tectonophysics*, 630: 193-207 [DOI: 10.1016/j.tecto.2014.05.024]
- Wu H J, Guo M Z and Zhang J. 2006. Application of remote sensing technology in the field of earthquake prevention and disaster reduction. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 26(3):267-269 (吴焕娟, 郭明珠, 张皎. 2006. 遥感技术在防震减灾领域中的应用. *地震工程与工程振动*, 26(3):267-269) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1301.2006.03.074]
- Xing H L, Jiang T and Li W Y. 2005. Key problems on developing and revising the urban emergency response plan of destructive earthquakes. *Earthquake*, 25(3): 115-122 (邢海灵, 蒋通, 李文艺. 2005. 城市破坏性地震应急预案的编制与修订要点探讨. *地震*, 25(3): 115-122) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2005.03.017]
- Xu C J, Lin D L and Wen Y M. 2010. Extract and Analysis Surface Deformation Caused by Wenchuan M_w 7.9 Earthquake from InSAR Data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 35(10): 1138-1142 (许才军, 林敦灵, 温扬茂. 2010. 利用InSAR数据的汶川地震形变场提取及分析. *武汉大学学报(信息科学版)*, 35(10): 1138-1142)
- Xu J H, Nie G Z and Liu W Q. 2010. Multiple and Heterogeneous Earthquake Disaster Information Classification and Code. *Journal of Catastrophology*, 25(B10): 286-290 (徐敬海, 聂高众, 刘伟庆. 2010. 多源异构地震灾情分类与编码研究. *灾害学*, 2010, 25(B10): 286-290) [DOI:10.3969/j.issn.1000-811X.2010.z1.062]
- Xue T F. 2017. Earthquake damaged buildings extraction from SAR images using change detection technology based on multiple features. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration (薛腾飞. 2017. 基于SAR多特征变化检测的震害建筑物提取研究. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)
- Xue T F, Zhang J F and Li Q. 2016. Extraction of earthquake damage buildings from multi-source remote sensing data based on correla-

- tion change detection and object-oriented classification techniques. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 496-505 (薛腾飞, 张景发, 李强. 2016. 基于相关变化检测与面向对象分类技术的多源遥感图像震害信息提取. *地震学报*, 38(3): 496-505) [DOI: 10.11939/jass.2016.03.017]
- Yang Z and Cheng J Y. 1993. Survey of earthquake disasters by airborne remote sensing in Nanchang and Gengma Area. *Remote Sensing for Land & Resources*, 5(1): 17-22 (杨喆, 程家喻. 澜沧——耿马地震灾情的航空遥感调查. *国土资源遥感*, 1993, 5(1):17-22)[DOI: 10.6046/gtzyyg.1993.01.04]
- Ye X, Wang J and Qin Q M. 2016. Damaged building detection based on GF-1 satellite remote sensing image: a case study for Nepal Ms8.1 earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 38(3): 477-485 (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. *地震学报*, (3):477-485)[DOI:10.11939/jass.2016.03.015]
- Yonezawa C and Takeuchi S. 2001. Decorrelation of SAR data by urban damages caused by the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. *International Journal of Remote Sensing*, 22(8): 1585-1600 [DOI: 10.1080/01431160118187]
- Yonezawa C, Tomiyama N and Takeuchi S. 2002. Urban damage detection using decorrelation of SAR interferometric data//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Toronto: IEEE: 2051-2053 [DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026441]
- You Z B. 2016. Analysis and reference of emergency response to Kumamoto earthquake in Japan. *Administrative Reform*, (8):3 (游志斌. 2016. 日本熊本地震应急响应分析及借鉴. *行政管理改革*, 2016(8):3) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-7453.2016.08.013]
- Yuan X X, Wang X Q, Dou A X, Dong Y F, Wang L and Jin D J. 2012. Terrestrial LiDAR-based 3D modeling analysis of surface rupture caused by Yushu earthquake. *Seismology and Geology*, 34(1): 39-46 (袁小祥, 王晓青, 窦爱霞, 董彦芳, 王龙, 金鼎坚. 2012. 基于地面LiDAR玉树地震地表破裂的三维建模分析. *地震地质*, 34(1): 39-46) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4967.2012.01.005]
- Yusuf Y, Matsuoka M and Yamazaki F. 2001. Damage assessment after 2001 Gujarat earthquake using Landsat-7 satellite images. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 29(1): 17-22 [DOI: 10.1007/BF02989909]
- Zhai W, Shen H F, Huang C L and Pei W S. 2016. Building earthquake damage information extraction from a single post-earthquake Pol-SAR image. *Remote Sensing*, 8(3): 171-185 [DOI: 10.3390/rs8030171]
- Zhai W. 2016. Acquisition of building seismic disaster information based on single phase full polarization SAR image. *Earthquake Research In Shanxi*, (1):19-22+45 (翟玮. 2016. 基于单时相全极化SAR影像的建筑物震害信息提取. *山西地震*, (1):19-22+45)[DOI:CNKI:SUN:SXDZ.0.2016-01-006]
- Zhang D C. 1993. Preliminary study on visual interpretation marks of building damages caused by earthquakes on aerophotograph. *Earthquake*, (1): 26-30 (张德成. 1993. 建筑物震害航空照片目视判读标志的初步研究. *地震*, (1): 26-30)
- Zhang H Z, Wang Q, Zeng Q M and Jiao J. 2015. A novel approach to building collapse detection from post-seismic polarimetric SAR imagery by using optimization of polarimetric contrast enhancement//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan: IEEE: 3270-3273 [DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326516]
- Zhang J F, Xie L L and Tao X X. 2002. Change detection of remote sensing image for earthquake damaged buildings and its application in seismic disaster assessment. *Journal of Natural Disasters*, 11(2):59-64 (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. *自然灾害学报*, 11(2):59-64) [DOI: 10.3969/j.issn.1004-4574.2002.02.010]
- Zhang K X, Ye H L, Zhang H J and Yang S Y. 2019. Analysis on rock slope failure and dynamic response induced by earthquake. *Quaternary Sciences*, 39(6): 1514-1523 (张昆祥, 叶海林, 张化杰, 杨淑艳. 2019. 地震诱发岩质边坡破坏及动力响应分析. *第四纪研究*, 39(6): 1514-1523) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2019.06.18]
- Zhang W Y, Qin K, Zhang C C, Yang L N and Ma R F. 2007. On feature extraction from remote sensing image based on knowledge. *Geospatial Information*, 5(1): 66-69 (张文元, 秦昆, 张成才, 杨丽娜, 马茹菲. 2007. 基于知识的遥感图像地物提取方法研究. *地理空间信息*, 5(1): 66-69) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-4623.2007.01.024]
- Zhang Y M. 2012. Object-Oriented Classification of Polarimetric SAR Imagery Based on Polarimetric and Texture Features. *Shandong University of Science and Technology*(张艳梅. 2012. 融合极化和纹理特征的SAR影像面向对象分类. 山东科技大学)
- Zhao F J and Zhang L. 2009. Object-oriented method for extracting seismic disaster information using remote sensing images—a case study of Wenchuan earthquake. *Earthquake*, 29(S1): 130-138 (赵福军, 张磊. 2009. 面向对象的遥感震害信息提取方法——以汶川地震为例. *地震*, 29(S1): 130-138) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3274.2009.z1.018]
- Zhao X Y, Hu K, Burns S F and Hu H T. 2019. Correction to: classification and sudden departure mechanism of high-speed landslides caused by the 2008 Wenchuan earthquake. *Environmental Earth Sciences*, 78(10): 301 [DOI: 10.1007/s12665-019-8287-z]
- Zhou C H, Du Y Y and Luo J C. 1996. A description model based on knowledge for automatically recognizing water from Noaa/Avhrr. *Journal of Natural Disasters*, 5(3): 100-108 (周成虎, 杜云艳, 骆剑承. 1996. 基于知识的AVHRR影像的水体自动识别方法与模型研究. *自然灾害学报*, 5(3): 100-108)[DOI: CNKI:SUN:ZRZH.0.1996-03-015]
- Zhu B Q, Wei C J and Zhang Y Z. 1998. The quick extracting of earthquake disaster data by aerial remote sensing survey. *Journal of Natural Disasters*, 7(1): 34-39 (朱博勤, 魏成阶, 张渊智. 1998. 航空遥感地震灾害信息的快速提取. *自然灾害学报*, 7(1): 34-39) [DOI: CNKI:SUN:ZRZH.0.1998-01-005]

Application and trend analysis of remote sensing technology for earthquake emergency investigation

LI Qiang¹, GENG Dan², ZHANG Jingfa¹, GONG Lixia¹

1. National Institute of Natural Hazards Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China, Beijing 100085, China;

2. Twenty First Century Aerospace Technology Co., Ltd, Beijing 100096, China

Abstract: Earthquakes are sudden natural disasters that cause great loss of human life and property. However, starting an emergency response and carrying out rapid assessment of the disaster situation during the first few moments after an earthquake can effectively reduce the damage caused by the earthquake. Space Earth Observation Technology plays an important role in earthquake emergency because of its macro, fast, and wide coverage. With the continuous development of space earth observation technology and data processing technology, scholars worldwide have conducted several in-depth research on the extraction of earthquake damage information in the remote sensing emergency process. However, in actual emergency operations, a universal workflow does not exist. To promote in-depth and real operational efficiency of remote sensing earthquake emergency work, the problems in remote sensing emergency work are analyzed, and the future development trend of remote sensing earthquake emergency is put forward, so as to make the application of remote sensing technology in earthquake prevention and disaster reduction efficient. The timeliness of remote sensing emergency to a certain extent affects the efficiency and accuracy of decision-making that is vital in emergency assistance. At different stages of a disaster, the demand for remote sensing images, such as spatial resolution and time resolution, varies. In view of the application of remote sensing technology in earthquake emergency investigation, we analyze the application of remote sensing technology in the process of earthquake emergency by means of a literature review. According to the classification of optical remote sensing image and SAR image, we analyze and introduce the methods of earthquake damage information investigation using different type of remote sensing images, such as supervision classification, change detection, and depth learning.

In the recognition of earthquake damage information, high-resolution optical remote sensing images usually only use their spectral features, ignoring the application of spatial distribution features and geometric features. Traditional pixel based classification methods are easy to contain salt and pepper effect in the classification results, so it is necessary to develop object-based multi feature knowledge driven classification technology on this basis. Therefore, the method of combining object-oriented analysis and knowledge integration will become the mainstream method of earthquake disaster extraction and evaluation in the future. For SAR images, the seismic damage evaluation of single temporal SAR images mainly focuses on the average seismic damage evaluation in blocks, and there is less research on the imaging mechanism, feature performance and information extraction of single buildings. After the earthquake, the earthquake damage targets are complex and diverse. In order to fully realize the automatic extraction of earthquake damage targets based on remote sensing images, it still needs the continuous improvement and development of the algorithm. Traditional change detection methods are mainly aimed at the same type of sensors. The effective combination and interactive utilization of remote sensing image data from different sources is also the development trend in the future. The characteristic information of earthquake damage targets with different degrees of earthquake damage in remote sensing images is also different. The feature-based object-oriented change detection method can make full use of the feature information of the image and effectively improve the accuracy of seismic damage identification. Therefore, the focus of multi temporal image change detection is the effective application of spatial features in object level change detection.

We then summarize the existing problems and discuss the main difficulties faced by remote sensing earthquake emergency and the solutions from three aspects. Combined with real-time orbit data and practical work, the paper analyzes the future development trend of remote sensing technology in earthquake prevention and disaster reduction from the aspects of multi-technology combination of intelligent disaster identification, multi-source data collaborative analysis, and development of agile satellite. Through this approach, we promote remote sensing monitoring means to provide dynamic, real-time, and continuous space information emergency service, and improve the rapid development of earthquake emergency work response, refinement, and business application. This research can provide a good reference for the scientific research and business application of multi-source remote sensing technology in earthquake emergency investigation, and give more efficient play to the applicability and level of remote sensing technology in earthquake prevention and disaster reduction.

Key words: remote sensing, earthquake, emergency investigation, emergency special products, earthquake damage information extraction

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.41874059); Major Projects of High Resolution Earth Observation (civil part) (No. 31-Y30B09-9001-20/22-04); The Second Batch of Civil Aerospace Pre-research Projects during the 13th Five Year Plan (No. B0304); The Special Item for Public Welfare of Scientific Research Project from Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration (No. ZDJ-2019-32, ZDJ2017-29, ZDJ-2018-14)