

国产 HJ 小卫星遥感影像多特征融合 用于日本海啸灾情快速监测

杜培军^{1,2}, 柳思聪², 谭琨²

1. 南京大学地理信息科学系, 南京 210093
2. 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室, 江苏徐州 221116

摘要 针对特大地震和海啸灾害的特点与灾情监测的需求, 设计和构建了一种基于多特征决策级融合的灾情快速变化检测方法, 首先利用遥感影像中提取的 NDVI、主成分变换分量、独立成分变换分量等特征分别提取变化信息, 然后对多种变化信息进行决策级融合, 获得具有更高可靠性的变化图, 用于灾情分析。将所设计的方法用于国产环境与灾害监测预报小卫星 HJ-1A/B 数据处理分析, 对日本东部沿海区域海啸灾害前后进行变化检测与灾情信息提取试验, 有效地检测了海啸灾害后的海水倒灌区域、陆地积水区、植被淹没区以及建筑受损区等变化区域。研究表明, 基于多源特征融合的非监督变化检测流程可以快速、有效地提取海啸受灾区域, 为灾害应急响应与灾情评估提供支持。

关键词 海啸灾害; 变化检测; 决策级融合; 环境与灾害监测预报小卫星

中图分类号 TP75/79

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.04.003

Rapid Monitoring of Japan Earthquake-triggered Tsunami Disaster Based on a Fusion of Multiple Features Derived from HJ Small Satellite Images

DU Peijun^{1,2}, LIU Sicong², TAN Kun²

1. Department of Geographical Information Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China
2. Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring, State Bureau of Surveying and Mapping of China, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu Province, China

Abstract The huge tsunami triggered by an earthquake of magnitude 9.0 on March 11, 2011 hit the east coast of Honshu, Japan, and caused serious social and economic losses. According to the characteristics of earthquake and tsunami disaster and the requirements of damage monitoring, a rapid disaster development detection process based on a decision level fusion of multiple features is designed. In this approach, each feature extracted from the original remote sensing images, including NDVI, NDWI, components of the principal component analysis and the independent component analysis, is used to derive a specific change map, and different change maps are then integrated by a decision level fusion algorithm to generate a synthetic change map with a higher reliability, which can be used for the damage assessment. Multi-temporal HJ-1A/B (environment and disaster monitoring and forecasting of small satellite constellation) images are processed by the proposed approach and used for detecting the devastated areas in east coast of Japan before and after tsunami. The experimental results confirm the feasibility and effectiveness of the proposed approach, and demonstrate the advantages of HJ-1A/B remote sensing data. This unsupervised change detection process can identify the tsunami-devastated regions quickly and efficiently, and provide the technical and decision support for the disaster emergency response and loss evaluation.

Keywords tsunami disaster; change detection; decision level fusion; environment and disaster monitoring and forecasting of small satellite

收稿日期: 2011-06-03; 修回日期: 2012-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871195); 对地观测技术国家测绘局重点实验室开放基金项目(K201007); 江苏省自然科学基金(BK2010182); 江苏省“333”工程科研项目(2009-32)

作者简介: 杜培军, 教授, 研究方向为遥感信息工程与地理信息科学, 电子邮箱: dupjrs@126.com

0 引言

尽管自然灾害往往是客观的、甚至是难以避免和不可改变的现实,人类的主观能动性对于积极探索灾害的成因、实时监测灾害的影响、有效评估灾害的损失、指导和帮助受灾地区尽早恢复生产生活、科学地将灾害损失降至最低仍然具有十分重要的现实意义。随着人-地关系矛盾的进一步加剧,全球环境变化问题愈发凸显,导致各种自然灾害(包括火山喷发、地震、海啸、飓风、洪水等)日益频发。中国既是受全球变化影响严重的国家之一,也是影响全球变化过程的重要国家之一,具有世界上比较典型和独一无二的全球变化响应敏感区^[1]。所以科学地认识全球变化过程及对人类社会的影响,具有极其重要的现实意义。近年来,中国各种自然灾害集中发生,如四川汶川特大地震、甘肃舟曲泥石流、青海玉树地震、东南沿海台风灾害等,为经济、社会造成了巨大的损失和影响。而从全球尺度来看,各种自然灾害更是对人类生活和社会发展造成了极其巨大的破坏,急需建立一个健全的防灾

减灾机制,探寻有效的灾情监测手段和可靠的信息处理方法,努力将灾害损失降至最低。

日本当地时间 2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分(北京时间 13 时 46 分),日本本州岛东海岸附近海域发生里氏 9.0 级特大地震,震中距离最近的海岸城市仙台 130km (38.1°N, 142.6°E),如图 1 所示。由地震引发的巨大海啸冲击了日本仙台、宫城县、福岛县、岩手县等沿岸城市,造成重大人员伤亡和损失,并导致日本福岛县第一核电站机组发生爆炸,核泄漏事件的影响更是不可估量。针对本次日本海啸灾害的代表性和巨大破坏性,本研究拟以其为例,利用国产卫星数据对重大自然灾害的灾情进行有效监测和评估,总结和探讨灾害监测的快速响应策略,评估国产环境与灾害监测预报小卫星 HJ-1A/B 遥感数据在灾情监测中的应用效果,提出和构建有效的遥感影像处理算法,从而为灾害监测和防灾减灾提供技术支持。

本文将反映海啸灾害特性的多源特征决策级融合这一

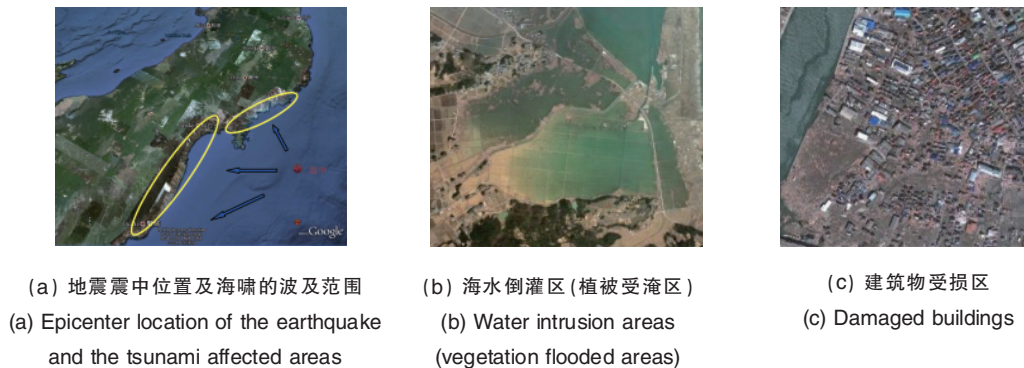


图 1 日本 311 特大海啸位置及受灾区域

Fig. 1 Location of the Japanese earthquake-triggered tsunami and the devastated coastal areas

思想引入海啸灾前后遥感灾情监测与评价过程,从多时相遥感影像变化检测技术的角度设计和提出一种快速非监督海啸灾情变化检测过程模型。通过比较各种遥感数据的可获得性和数据质量,选用国产环境与灾害监测预报小卫星(HJ-1A/B)影像作为数据源对日本 311 特大地震海啸受灾区域进行灾情监测试验。结果表明,本文方法可以快速、有效、准确地获取海啸受灾区域的变化信息,包括海水倒灌区、积水淹没区及建筑物受损等区域,为灾害救援、灾区重建等提供重要的决策支持。

1 海啸灾害遥感监测与变化检测方法研究进展

对于诸如海啸等重大自然灾害的防灾减灾工作,灾后的损失评估是至关重要的工作,包括确定受灾目标的位置、灾情的分布范围以及受灾损失的程度等。通常,从航空、航天探测器、地面人工勘察等工作模式可以获得对于灾情评估的第一手数据资料,而卫星遥感技术由于其独特的处理优势和潜在的观测能力逐渐成为对于灾情的快速、有效监测的首选^[2]。其中,多时相遥感影像变化检测技术又将成为灾害监测的重

要技术手段。

利用卫星传感器对同一区域进行大范围的持续观测,获取该区域不同时相的遥感影像数据,经过人工和计算机协同处理和分析,提取出有价值的变化信息,在土地资源调查、森林和植被变化监测、城市扩展等诸多领域发挥着积极和重要的作用,同时也可为大范围灾情监测与灾后评估提供有效的技术支持与能力保障^[3-5]。很多研究者对变化检测的分类体系进行了划分和定义^[4,6-7],其中最常见方案是分为监督变化检测和非监督变化检测,前者类似于监督分类,需要根据先验知识事先获得合适的训练样本以输入检测模块进行检测,如分类后比较、支持向量机和人工神经网络等^[8-10];后者不需要获得先验样本,直接对预处理后的多时相影像进行处理获得差异影像,然后根据阈值提取变化信息,这一方法体系是变化检测研究中的重要方向,如影像差值阈值法、变化矢量分析法、主成份分析法等^[11-13]。

国内外许多学者对于变化检测技术在灾害监测、特别是海啸灾害监测中开展了一系列的研究。张永红等^[14]基于 DMC 卫星影像对 2004 年印度尼西亚海啸灾区的土地覆盖类型变

化进行分析,表明 DMC 小卫星对于大范围、快速灾害监测具有较好优势;黄诗峰等^[5]对 2004 年印度尼西亚海啸中亚齐省灾情进行遥感监测与分析,基于 GIS 手段和 DEM 进行海啸灾情的快速评估;Bovolo 等^[6]提出一种适用于大范围区域海啸灾害变化监测的非监督方法,基于整个图像分割至小块图像,并自适应分析每个小块图像,进行阈值处理以获得最终检测结果;Sumer 等^[6]利用分辨率 QuickBird 影像 2004 年印度尼西亚海啸进行遥感监测,运用变化检测技术中的差值、比值和分类后比较法分析和对比灾情监测结果;Theilen-Willige^[17]利用 Landsat ETM 和 SRTM-DEM 等其余反映地质构造的数据,通过 GIS 平台分析委内瑞拉北部海域受海啸影响的潜在危险程度。

虽然不同的变化检测技术在海啸灾害监测实例中展现出一定的应用价值,但是就海啸灾情监测的现实运用,还是存在一定的问题和限制。首先,从使用的遥感影像数据角度来看:(1) 高分辨率遥感卫星如 QuickBird, IKONOS, GeoEye 等虽然可以提供较高的地面分辨率影像数据,有助于对损毁建筑等的精细检测,但是数据处理量大,不适合大范围区域内的灾情实时监测与分析。同时,虽然可以获得灾后某区域的高分辨率影像,但是大多数情况下受灾前该区域通常不是高分辨率卫星感兴趣的观测区,灾前高分辨率影像的获取往往是制约着监测过程能否有效开展的重要因素^[2];(2) 低分辨率卫星影像数据如 NOAA, MODIS 等分辨率过低,虽然可以从大范围上提供区域的整体受灾概况,但是就局部灾情监测并不能提供有效的数据支持;(3) 中低分辨率卫星影像是灾害监测中最有利的数据来源,但是现有的诸如 Landsat, SPOT, ALOS 等卫星重访周期长,并不能有效地满足对于突发自然灾害的快速响应及应急监测。因此,从数据源角度来看,急需一种具有重访周期短、适用于大范围实时、快速灾害监测的卫星遥感数据源,以有效应对重大灾害的灾前监测和损失评估。

其次,从变化检测技术的运用来看:(1) 监督型变化检测算法可以获得较非监督方法更精确和丰富的变化信息,但在灾区进行实地勘察的可行性不高,所以一般情况下对于受灾区域的先验知识还是相对缺乏。同时,监督型方法需要耗费更多更长的训练时间,且人工训练样本、分类算法模型的选择影响着最终检测结果的精度;(2) 非监督型变化检测算法避免了先验样本的选取,但是需要选择合适的阈值确定准则,新型的机器学习算法诸如最大期望(EM)迭代的聚类算法、遗传算法、核方法等虽然可以有效提高检测精度,但是却牺牲大量的计算时间和处理量,难以满足灾害监测的大范围应用、快速响应的应用目的;(3) 通常变化检测算法选择原始光谱数据作为输入特征,没有很好地挖掘和利用体现海啸灾害特性的派生特征。因此,需要一种针对海啸灾情监测的非监督变化检测过程模型,以适应于海啸灾害快速监测的应用需求。

针对以上问题,从数据源选择上,本文利用国产的环境与灾害监测预报小卫星星座 A、B 星(HJ-1A/B 星)多光谱遥

感影像数据,利用其中等空间分辨率(30m)、较短的重访周期(4d)实现大范围、快速响应下的海啸灾情监测;在方法层面,基于多时相遥感影像变化检测技术,检测和集成反映海啸灾害特性的不同特征数据,以综合多源特征优势,提高检测的准确性和完整性。

2 基于多特征融合的海啸灾情快速监测

尽管不同变化检测方法在不同应用中取得了各自良好的应用效果,但是没有一种变化检测方法适用于大多数情况下的检测应用,更没有一种检测算法可以说是最优的^[4,18]。通常进行变化检测时,对于特征数据的输入和方法的选择往往依赖于主观认识,单一特征的选用容易导致检测结果中过多的不确定性。同时,不同特征数据对于变化检测贡献和作用不同,如何有效集成和组合其优势信息,提高检测精度和变化信息的完整度值得进一步探讨。本文旨在针对海啸灾情监测的特点,设计一种多特征决策级集成的快速变化检测方法,以有效满足海啸灾害的实际应用。

在通常的海啸灾害中,对于灾情的监测主要集中于 2 部分:(1) 由海啸冲击海岸导致的海水倒灌区域和积水区域;(2) 海啸冲击导致的植被受淹和建筑物损毁区域。根据以上检测的应用目的,设计了如图 2 所示的基于多特征融合的非监督海啸灾情快速变化检测方法。

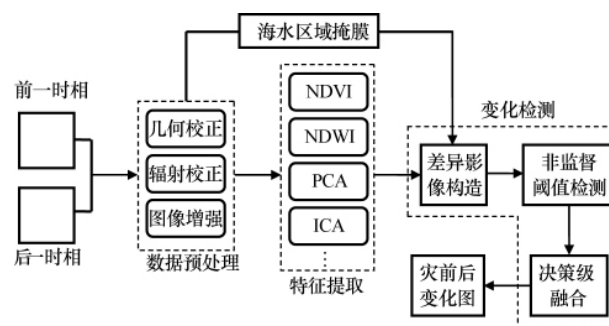


图 2 基于多特征融合的海啸灾情快速变化检测流程

Fig. 2 Flowchart of the proposed quick tsunami-damage detection procedure based on feature fusion

方案的具体实现步骤如下:

(1) 对于所获取的海啸灾前灾后遥感影像数据进行预处理,包括辐射校正、影像对影像几何精校正、图像增强等主要操作。在此基础上,提取出前一时相影像中海水的区域制作成掩膜。

(2) 针对海啸灾害特点,分别提取 2 个时相影像中反映植被和水体特性的归一化植被指数(NDVI)、归一化水体指数(NDWI)等指数影像,同时对两时相原始光谱影像进行差值处理(步骤(3)),对差异影像进行主成份变换(PCA)、独立主分量变换(ICA)等,选取其中能够表征灾害受损区域的特征分量叠加构造一个多维特征向量用于变化检测,并对其进行内部归一化处理,以满足后续的融合与检测需求。假设 F_N^T 和

$F_N^{T_1}$ 分别表示根据灾前 (T_1) 和灾后 (T_2) 时相影像提取的反映灾害特性的多维特征向量, 以前者为例, $F_N^{T_1} = \{x_i^{T_1} \mid i=1, 2, \dots, n\}$, 其中 $x \in \{\text{NDVI}, \text{NDWI}, \text{PC}, \text{IC}, \dots\}$, N 为特征个数。

(3) 根据以上提取的两时相多维特征影像构造其差异影像(差值、比值等), 并选择合适的非监督变化阈值确定算法分别检测出各个特征的变化结果图。令 f_i^D 为两时相某一特征向量的差异影像, 运用阈值算法对差异影像中每个特征确定阈值 T_i , 获得变化检测结果 CM_i :

$$f_i^D = f_i^2 - f_i^1 \quad (1)$$

其中, \cdot 为差值或者是比值运算。

$$CM_i = \begin{cases} 1, & f_i^D \geq T_i \\ 0, & f_i^D < T_i \end{cases} \quad (2)$$

其中, 1 和 0 分别为检测出的受灾区域和未受灾区域。

(4) 在此基础上, 运用决策级的融合策略对 N 个多源特征的检测结果进行决策集成, 以充分利用多个特征对于灾害变化检测的优势, 最终输出决策最优的灾害变化图 CM_{Final} 。其中, 常用的决策级融合策略包括投票法 (Majority Voting, MV)^[9]、模糊积分 (Fuzzy Integral, FI)^[9]、证据理论 (Dempster-Shafer evidence theory, D-S)^[20] 等:

$$CM_{\text{Final}} = H_{\text{fusion}}(CM_i) \quad (3)$$

式中, $H_{\text{fusion}}()$ 为选择的决策级融合模型。

从海啸灾害监测快速响应的应用需求, 以及对于实地测试样本的可获得性难易程度出发, 本研究选用易实现且效果较优的多数投票法作为决策级融合模型, 以有效综合不同特征集对于变化信息的表征能力。D-S 和 FI 模型需要测试样本数据计算后验概率, 且运算时间较长, 不适于大范围区域、快速的灾害变化检测运用。而 MV 作为一种简单的模式识别过程, 通过对多个特征集检测结果中的投票处理, 将多数识别结果作为最终决策输出, 实现融合过程。具体模型思路如图 3 所示。

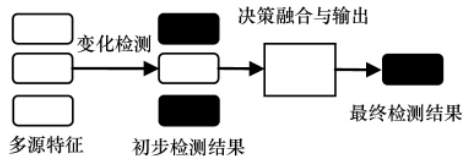


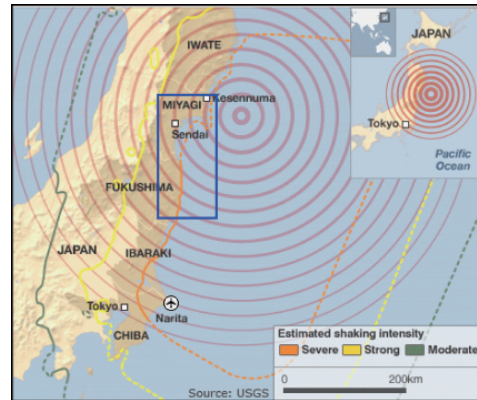
图 3 简单多数投票法决策融合过程

Fig. 3 Process of the majority voting decision fusion

3 试验与分析

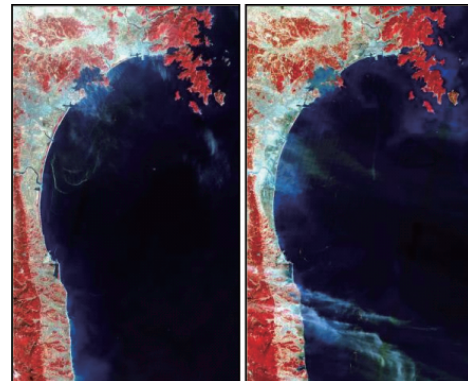
试验使用国产环境与灾害监测预报小卫星 HJ-1A/B 多光谱数据, 包括可见光 RGB 三波段及近红外波段, 影像获取时相分别为 2011 年 2 月 24 日 (HJ-1A CCD1) 与 2011 年 3 月 14 日 (HJ-1B CCD1)。灾后影像距离 3 月 11 日地震引发海啸的日期仅为 3d, 可用于第一时间的大海啸灾情监测与评估。根据研究区实际情况和影像覆盖的范围, 选取影像上 2383×3961 个像素范围作为试验区域, 主要包括了日本本州岛东海岸的牡鹿半岛、宫城、仙台、岩沼、相马、南相马等沿海城市及

海岸带。图 4(a) 为研究区所处的位置和地震强度图 (来源: 美国 USGS 网站 www.earthquake.usgs.gov), 图 4(b) 和 (c) 分别为研究区受海啸冲击灾害前后 HJ 多光谱影像 432 波段的假彩色合成影像。



(a) 研究区位置及地震强度图

(a) Location of the study area and seismic intensity map



(b) 海啸灾前

(c) 海啸灾后

(b) Before tsunami

(c) After tsunami

图 4 研究区位置及海啸灾害前后 HJ-1A/1B 标准假彩色合成影像

Fig. 4 Location of the study areas and their false color composite images from HJ-1A/1B satellite before and after tsunami

根据 HJ 影像数据和海啸灾害的特点, 提取原始影像的 NDVI 指数影像和两时相差值影像的 PC2、IC3 这三种较好反映灾前后植被、水体和建筑物等变化的特征因子构造特征向量数据, 并选用图像差值法得到差异影像。在兼顾检测效率和计算速度的前提下, 选择改进的非监督 KI 阈值确定算法^[21] 对多源特征向量的差异影像进行变化检测, 并运用多数投票法进行检测结果的决策级集成。对最终输出海啸受灾区域灾前后变化检测结果进行简单后处理, 通过分析单个像元与邻近像元的关系, 剔除和替换出现的小于 3 个像素的孤立目标点, 最终结果如图 5 所示。图 5(a) 为研究区海啸受灾范围的整体检测结果图, 红色部分为受灾区, 灰色部分为海水掩膜, 图 5(b)-(g) 分别为研究区中 6 个受灾较严重区域的灾前、灾后以及检测结果的局部放大图, 以便于进一步可视化和灾情

分析。表 1 为受灾区域面积的统计结果。

从图 5 和表 1 可以看出, (1) 从整体检测结果来看, 本文提出的海啸灾情快速变化检测方法有效检测到了海啸灾前后的海水倒灌区域、陆地积水区、植被淹没区以及建筑受损区等变化区域, 且与灾前后原始影像的对比分析结果较一致。(2) 本文提出的非监督海啸灾前后变化检测过程无需实地考察和先验样本知识, 利用前后两期遥感影像数据, 可以快速且有效地获取第一时间的灾情状况。同时, 根据海啸灾后的特点, 提取出的 NDVI 等指数影像可以有效表征受灾区域变化的趋势, 比原始影像检测和处理时降低了无用光谱信息和噪声的干扰, 使得检测结果更为突出海啸灾情的特性,

有利于受灾区域的提取。从局部检测图 5(b)–图 5(g) 来看, 水体、植被等的变化是灾前后该区域的主要变化形式, 而对于特征影像的有效应用则是反映这些变化的重要途径。(3) 不同的特征指数检测结果必定具有不一致性和单一性, 利用决策级融合策略有效集成单一特征源的检测结果, 能够增强检测结果的完整性和稳定性。从局部的检测结果来看, 决策级融合后的检测目标结构、形状较为完整, 且有效抑制了出现在单一特征数据检测结果中的漏检和虚检变化。(4) 从海啸灾害前后受灾区域面积来看, 在海啸中遭受破坏的受灾区域面积约为 133.8651km², 占研究区陆地总面积的 5.04%, 未受灾区域面积约为 2521.1457km²。本次 311 日本特大地震引发

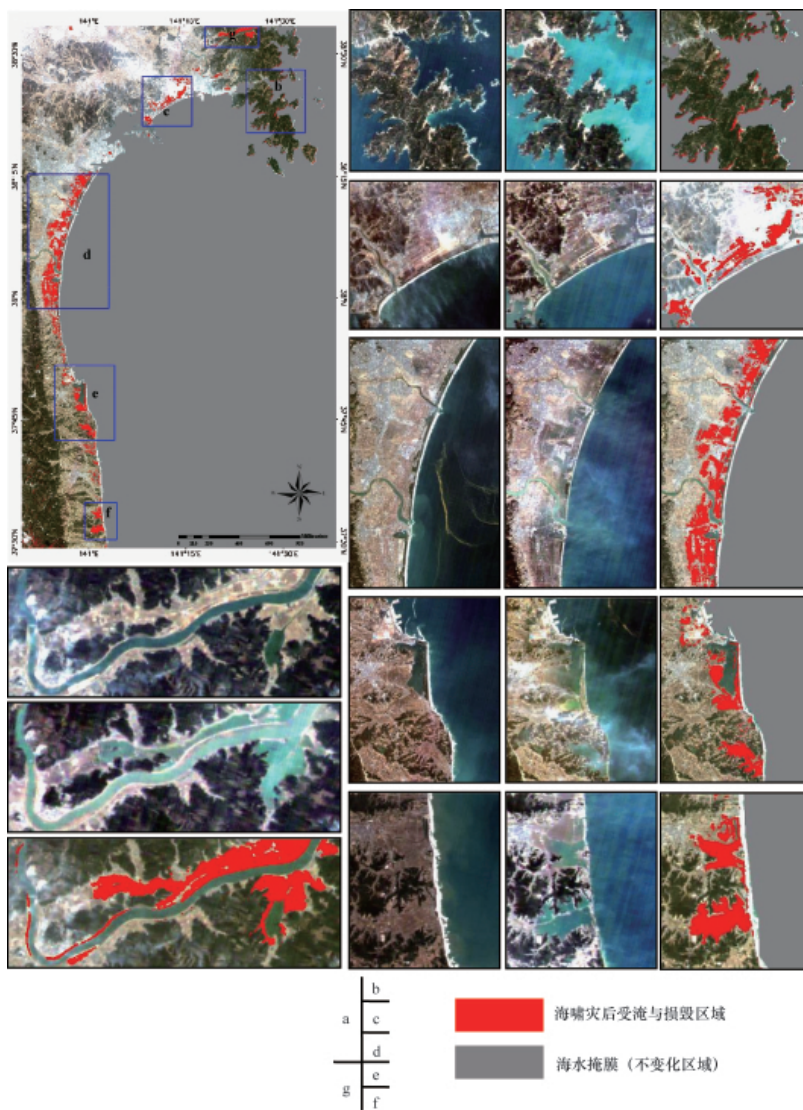


图 5 HJ 小卫星海啸灾情监测结果

Fig. 5 Change detection results from HJ small satellite before and after tsunami

表 1 研究区海啸灾害受灾范围面积统计

Table1 Statistics of the tsunami-devastated areas

	受灾区域	未受灾区域	陆地总面积	海洋面积	研究区总面积
面积/km ²	133.8651	2521.1457	2655.0108	5840.1459	8495.1567
百分比/%	5.04	94.96	100	—	—

的海啸袭击和摧毁了本州岛东海岸的大部分区域,受灾程度严重,影响范围较广。通过遥感技术手段,可实现大范围区域尺度下的动态监测,获得第一手的数据信息,如受灾面积和位置信息等,为实际灾后评估与重建提供重要的统计数据。

4 结论

本文以 2011 年 3 月 11 日日本特大地震海啸灾害为例,提出和构建了基于多源特征决策级融合和非监督变化检测技术的海啸灾情快速监测方法,以反映海啸灾害的特点,实现受灾区域与目标的快速提取。利用国产的多时相 HJ 小卫星多光谱影像数据进行变化检测试验,评价该方法的适用性和可行性。通过试验和研究,可以得出以下结论。

(1) 本文所提出的基于多源特征决策级融合的非监督变化检测方法在海啸灾情快速监测中是实际可行且有效的。从整体和局部的检测结果来看,该方法可以有效获得灾前后不同形式的变化类型,如海水倒灌区、积水区、植被和建筑受淹区等,为多时相遥感影像变化检测技术在海啸灾情动态监测中提供了积极的探索和有力的技术支持。

(2) 该方法集成了反映海啸灾害特点的多种特征数据,并在其单一检测结果的基础上进行决策级融合输出,以有效实现多种特征的优势互补,提高受灾目标检测和提取的准确性及稳定性,在实际海啸灾害监测中具有一定的研究和应用价值。

(3) 国产环境与灾害监测预报小卫星遥感影像数据,由于其中分辨率、较短的重访周期等众多优势,结合多时相遥感影像变化检测技术,可以实现对于重大灾害如海啸、地震、洪水等的大范围、快速、实时监测,具有较大的应用前景和应用潜力,后续星的雷达影像更可为不同形式的灾害监测提供更为丰富和稳定的数据源。

当然,在对于具体精确目标如建筑物等受损检测时,需结合更高分辨率等多源遥感数据源,从不同尺度上有效评价灾害的影响程度及影响范围。这也将是今后研究的主要方向和研究重点。

致谢 感谢中国资源卫星应用中心提供日本 311 海啸前后两期环境与灾害监测预报小卫星 CCD 影像数据。

参考文献 (References)

- [1] 郭华东. 全球变化敏感因子的空间观测与认知 [J]. 中国科学院院刊. 2010, 25(2): 167-169.
Guo Huadong. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2010, 25(2): 167-169.
- [2] Liu Y L, Wei C J, Yan S Y, et al. Assessment the losses of tsunami disaster in aceh province of Indonesia by remote sensing [C]. 26th ACRS2005. Haoni, Vietnam, 2005, DST1-2.
- [3] Bovolo F, Bruzzone L. A split-based approach to unsupervised change detection in large-size multi-temporal images: application to tsunami-damage assessment [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1658-1670.

- [4] Lu D S, Mausel P, Brondi'Zio E, et al. Change detection techniques[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(12): 2365-2407.
- [5] Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(6): 989-1003.
- [6] Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, et al. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(9): 1565-1596.
- [7] Gong J Y, Sui H G, Ma G R, et al. A review of multi-temporal remote sensing data change detection algorithms [C]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Beijing: 2008, Vol. XXXVII. Part B7. 757-762.
- [8] Bruzzone L, Serpico S B. An iterative technique for the detection of land-cover transitions in multitemporal remote-sensing images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 858-867.
- [9] Nemmour H, Chibani Y. Multiple support vector machines for land cover change detection: An application for mapping urban extensions[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2006, 61(2): 125-133.
- [10] Woodcock C E, Macomber S A, Pax-Lenney M, et al. Monitoring large areas for forest change using Landsat: Generalization across space, time and Landsat sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 78(1-2): 194-203.
- [11] 范海生, 马嵩乃, 李京. 采用图像差值法提取土地利用变化信息方法——以攀枝花仁和区为例[J]. *遥感学报*, 2001, 5(1): 75-80.
Fan Haisheng, Ma Ainai, Li Jing. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 75-80.
- [12] Bovolo F, Bruzzone L. A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 218-236.
- [13] Celik T. Unsupervised change detection in satellite images using principal component analysis and *k*-means clustering[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 772-776.
- [14] 张永红, 赵继承, 龙艳, 等. 基于 DMC 卫星影像对海啸灾情土地覆盖类型变化的分析[J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 498-502.
Zhang Yonghong, Zhao Jicheng, Long Yan, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(4): 498-502.
- [15] 黄诗峰, 李琳, 徐美, 等. 2004 年印度洋海啸印度尼西亚齐省灾情遥感监测与分析[J]. *遥感学报*, 2005, 9(4): 503-508.
Huang Shifeng, Li Lin, Xu Mei, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(4): 503-508.
- [16] Sumer E, Celebi F V. Detection of tsunami induced changes from high resolution satellite imagery[C]. *OCEANS 2006-Asia Pacific*. Singapore, 2006.
- [17] Theilen-Willige B. Tsunami hazard in northern Venezuela[J]. *Science of Tsunami Hazards*, 2006, 25(3): 144-159.
- [18] Li D R. Remotely sensed images and GIS data fusion for automatic change detection [J]. *International Journal of Image and Data Fusion*, 2010, 1(1): 99-108.
- [19] 柏延臣, 王劲峰. 结合多分类器的遥感数据专题分类方法研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 555-563.
Bo Yanchen, Wang Jinfeng. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 555-563.
- [20] Le Hegarat-Masce S, Bloch I, Vidal-Madjar D. Application of dempster-shafer evidence theory to unsupervised classification in multisource remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(4): 1018-1031.
- [21] Bazi Y, Bruzzone L, Melgani F. An unsupervised approach based on the generalized Gaussian model to automatic change detection in multitemporal SAR images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(4): 874-887. (责任编辑 岳臣, 张军)