引文格式:赵金奇,陈樟杰,牛玉芬,等.利用多时相双极化ALOS-2/PALSAR-2影像的2023年积石山Ms 6.2地震建筑物损毁检测[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):284-296.DOI:10.13203/j.whugis20240118

Citation:ZHAO Jinqi,CHEN Zhangjie,NIU Yufen,et al.Building Damages Detection of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Using Multi-temporal Dual Polarization ALOS-2 /PALSAR-2 Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):284-296.DOI:10.13203/j.whugis20240118

利用多时相双极化ALOS-2/PALSAR-2影像的2023年积石山Ms 6.2地震建筑物损毁检测

赵金奇[1] 陈樟杰[1] 牛玉芬[2] 张双成[3] 闫鹏飞[4] 王霞迎[5]

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116
2 河北工程大学矿业与测绘工程学院,河北 邯郸,056038
3 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
4 北京博宇智图信息技术有限公司,北京,112009
5 东华理工大学测绘工程学院,江西 南昌,330013

摘 要:2023-12-18凌晨,甘肃省积石山县发生Ms 6.2地震,造成17万间房屋严重损坏及倒塌。对震后建筑物损毁进行高精度检测,有助于快速了解建筑物损毁分布,为灾后应急救援提供重要支撑。合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)具备全天时、全天候对灾区进行观测的能力,且能够提供相位、强度与极化信息,如何充分利用SAR数据信息是精确提取损毁建筑物的关键。充分利用双极化ALOS-2/PALSAR-2影像强度与相位信息,联合双极化强度变化检测、相干性检测和合成孔径雷达干涉测量技术,对积石山地震进行建筑物损毁检测和同震形变场提取,并利用北京三号高分光学影像对建筑物损毁检测结果进行验证。实验结果表明:(1)双极化信息能够显著提升变化检测及同震形变场的监测精度;(2)经震前、震后高分辨率光学影像验证,证明联合强度变化检测和相干性检测技术均能够提取震区损毁建筑物,两者相互补充、互为印证;(3)同震形变场最大区域刘集乡、石塬镇,形变场周边地区大河家镇、官亭镇、吹麻滩镇均存在大量建筑损毁。

关键词:积石山地震;双极化SAR影像;强度变化检测;相干性检测;建筑物损毁

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-04-01

DOI:10.13203/j.whugis20240118 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0284-13

Building Damages Detection of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Using Multi-temporal Dual Polarization ALOS-2 /PALSAR-2 Data

ZHAO Jinqi[1] *CHEN Zhangjie*[1] *NIU Yufen*[2] *ZHANG Shuangcheng*[3]
YAN Pengfei[4] *WANG Xiaying*[5]

1 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China
2 School of Mining and Geomatics Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China
3 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
4 Beijing Smart Earth Digital Co.Ltd, Beijing 112009, China
5 School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: **Objectives**: On December 18, 2023, an Ms 6.2 earthquake occurred in Jishishan, Gansu Province, China, damaging 170 000 houses and severely affecting people's lives and property safety. Efficient and accurate detection can help to understand the distribution of building damage and provide crucial support for post-disaster emergency relief. **Methods**: This paper combines intensity change detection, coherence detection, and interferometric synthetic aperture radar technology using intensity and phase informa-

基金项目:国家自然科学基金(42307255,41901286);河北省自然科学基金(D2023402033);河北省教育厅科学研究项目(QN2024231);江苏省"双创博士"(JSSCBS20221531);江苏省科技副总项目(FZ20240048)。

第一作者:赵金奇,博士,副教授,主要研究方向包括极化SAR智能解译、湿地动态变化监测和矿山开采监测。masurq@cumt.edu.cn

通信作者:牛玉芬,博士,讲师。niuyufen@hebeu.edu.cn

tion from multi-temporal dual-polarized ALOS-2/PALSAR-2 images to identify building damage regions and coseismic deformation fields. First, a likelihood ratio change detection method is used to detect change regions from multi-temporal dual-polarization intensity images. Moreover, optimal coherence interferometric phase is extracted using different polarization mode combinations to obtain a more accurate coseismic deformation field. In addition, coherence change detection is introduced to detect different degrees of surface change distribution using pre- and post-earthquake interferometric coherence based on dual-polarization information. Finally, we combine intensity and coherence change detection results with world settlement footprint 2019 to map building damage regions. **Results**: The Beijing-3 optical images with a 0.3 m resolution are used to verify the effective of proposed method in building damage mapping. And the experimental results show that: (1) Intensity change detection results based on dual-polarization information are significantly better than single polarization, and the coherence estimation results based on dual-polarization information are also superior to single polarization interferometric pairs. Besides, coseismic deformation field using dual-polarization information avoids more phase unwrapping errors, and the deformation magnitude is similar to the Sentinel-1 results. (2) In the seven earthquake-affected towns, using the intensity change detection with dual-polarization information can detect the building damage area about 0.448 9 km^2 and using coherence change detection can detect the building damage area about 1.004 7 km^2. (3) Both temporal intensity and coherence change detection methods can extract building damage. In most case, damage regions with coherence-based change detection generally larger than intensity-based. **Conclusions**: (1) Dual-polarization information can significantly improve the accuracy of change detection and the coseismic deformation field. (2) Both intensity-based and coherence-based change detection using dual-polarization information can detect damaged buildings in the disaster area. (3) Compared to intensity-based change detection, coherence-based detection is more sensitive and detects a larger damage regions. (4) Intensity-based and coherence-based techniques can complement and corroborate each other, and effectively extract damaged buildings in the earthquake area.

Key words: Jishishan earthquake; dual-polarization SAR image; intensity change detection; coherence change detection; building damages

地震作为最具灾难性的自然灾害之一,其突发性高、破坏性大、防御难度大、余震持续时间长、易诱发次生灾害且产生的社会影响力大[1]。地震释放的巨大能量引起强烈的地面震动,造成大量人员伤亡和众多建筑物倒塌等[2],严重危及人民生命及财产安全。2023-12-18,中国甘肃省临夏回族自治州积石山县发生了Ms 6.2 地震,造成约150人遇难和近千人受伤,地震伴随着大量的崩塌、滑坡等次生地质灾害,导致17万间房屋严重损坏及倒塌[3-4]。对震后建筑物损毁分布进行高精度检测是灾害应急救援和灾后修复的关键[5]。

遥感技术由于其大范围、周期性观测的优势,成为震后建筑物损毁检测最为有效的手段之一[6]。光学卫星具备高分辨率、高光谱的特性,通过光谱、时间、纹理信息能够有效检测震后建筑物损毁分布[7]。但灾害发生后伴随的恶劣的天气导致观测区域受云雾影响严重,限制了光学影像对灾后建筑损毁区域检测的能力。合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像通过主动发射电磁波,能够在恶劣环境下对受灾区域进行有效的检测[8]。现阶段,利用时序信息的不同,SAR震后建筑物损毁检测方法主要包括基于单一震后影像[9]和基于震前震后影像[10]。基于单一震后影像方法不依赖参考影像的限制,能够快速对建筑物进行损毁评估和响应[6]。然而在震前先验知识缺乏的情况下,难以对建筑物进行精准损毁检测[11]。基于震前、震后影像的方法,提供多时相SAR影像强度、相位、极化和时间信息,不仅能够对震后区域地表覆盖变化进行检测,而且能够对灾害导致的地表形变进行监测,为震后建筑物损毁区域评估提供重要的数据支撑。

地震引起的地表形变会导致SAR影像相位的变化,合成孔径雷达干涉测量(interferometric SAR,InSAR)技术自成功应用于1992年Landers地震监测以来[12],已被广泛应用于数百计的地震监测[13]。根据形变量级的不同,利用InSAR技术可以对同震形变、震后震间形变进行监测[14-15]。大量研究表明,在同震形变场监测中L波段在地

形起伏不均、植被覆盖区域的相干性远优于C波段[16-17],且在形变梯度较大的区域,能够显著提高观测精度。InSAR相位信息对建筑物形状变化较为敏感,由于建筑物的损毁破坏了地物的后向散射特征,导致震前、震后数据出现失相干。相干性能够有效地反映地物散射特性的变化[18-20],使用相位信息的相干变化检测(coherent change detection,CCD)能够检测出地表小幅变化,当地表发生较大幅变化时,相干性则相对较低[21],利用该特性可以建立失相干系数与建筑物损毁间的关系[3]。

地震造成的建筑物损毁不仅会导致SAR影像相位变化,也会导致后向散射强度的变化[22-23]。利用多时相SAR强度变化检测技术能够有效描述震前、震后散射特性的变化[24-25]。无监督变化检测方法通过差异影像提取和阈值分割对变化信息进行检测,实现变化和非变化区域的区分,不需要先验知识,设计简单、准确高效[26-27],非常适合对震后建筑物损毁进行检测。此外,SAR影像不同的极化方式对建筑物后向散射描述优势不同,多极化信息已被证明能够对地物进行更多维度的表达,一定程度上能够提升变化检测的性能[28-29]。

随着卫星传感器硬件的不断提升,SAR传感器逐渐从低分辨率向高分辨率、单极化向多极化发展,为震后建筑物损毁检测提供数据支撑。ALOS-2卫星影像由于其具有更高分辨率、更多极化、更长波长,已被应用于多个地震的损毁检测和评估研究[30-31]。ALOS-2卫星多极化信息能够生成更优的相干性特征和检测细微的变化,为联合多时相、多极化强度和相干性信息进行建筑物损毁检测提供了可能[32-33]。

本文利用时序ALOS-2/PALSAR-2双极化影像,对积石山Ms 6.2地震进行震后建筑物损毁检测。首先,充分利用时序SAR影像时间、极化、强度和相位信息,联合强度变化检测和相干性检测方法,对震区建筑物损毁进行检测,并获取最优同震形变场;然后,利用北京三号震前震后高分辨率光学影像对本文方法检测的建筑物损毁进行评估;最后,探讨了双极化ALOS-2/PALSAR-2影像在震后建筑物损毁检测的优势。

1 研究区域和实验数据

1.1 研究区域

2023-12-18,甘肃省积石山县发生Ms 6.2地震,震中位于35.70°N,102.79°E,震源深度约10 km,震中邻近拉脊山北缘断裂,位于甘肃省和青海省相交之地,黄土高原和青藏高原交界处,属地震活跃区。由于本次浅层逆冲断层地震发生在甘肃省积石山县和青海省海东市交界处的人口稠密区,地震危害波及甘肃省和青海省多个乡镇,如甘肃省大河家镇、刘集乡、石塬乡、柳沟乡及青海省官亭镇、中川乡等。积石山地震及其余震共导致两省近80万人受灾、151人死亡,房屋严重损坏及倒塌近17万间,直接经济损失近150亿元。

1.2 实验数据来源

ALOS-2传感器支持单/双/全极化模式,考虑到研究区域在该时间段内ALOS-2卫星过境仅提供了双极化数据,且双极化数据在成像幅宽与空间分辨率上已能满足本研究的需求,鉴于研究区域数据的可获取性,选用了4景震区ALOS-2/PALSAR-2双极化数据(表1),覆盖范围见图1。在InSAR数据处理时,地形数据采用30 m分辨率的ALOS World 3D-30 m (AW3D30)数字高程模型(digital elevation model, DEM);建筑物分布采用2019版世界住区足迹数据(world settlement footprint,WSF)[34](图1)。此外,还收集了震前、震后Sentinel-2及北京三号0.3 m高分光学遥感影像,Sentinel-2覆盖震区,用于底图制作和WSF 2019震区住区足迹检验,北京三号部分覆盖震区(图1),用于建筑物损毁结果验证。

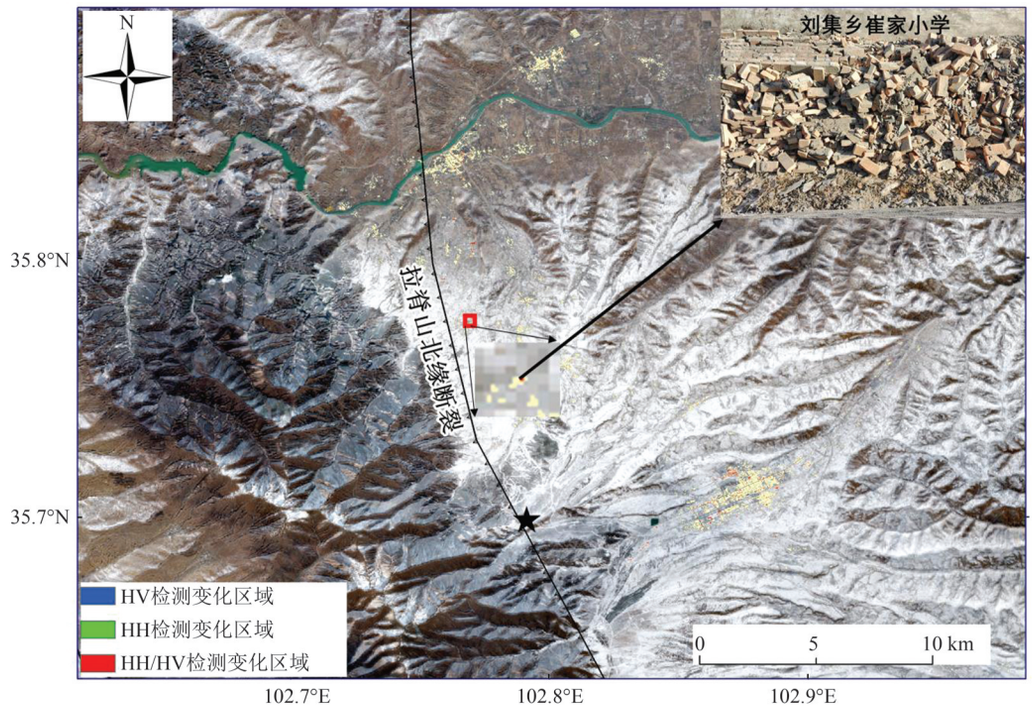
表1 研究数据种类和来源

Table 1 Types and Sources of the Study Data

数据类型	数据来源	观测日期		分辨率/m
SAR	ALOS-2/PALSAR-2	震前	2019-02-28	10
			2020-02-27	
			2022-02-24	
		震后	2023-12-20	
光学	北京三号	震前	2023-04-11	0.3
		震后	2023-12-20	
	Sentinel-2	震前	2023-12-18	10
DEM	AW3D30	震前	2016—2011年	30
居民地数据	WSF 2019	震前	2019年	10

2 研究方法

本文整体技术流程如图2所示:(1)使用ALOS-2/PALSAR-2多时相双极化图像的似然比变化检测方法来检测变化区域;(2)使用不同极化模式组合提取相干性最优的干涉相位,进一



(a) 震区位置及各数据范围



(b) 大河家镇房屋倒塌



(c) 刘集乡建筑损毁



(d) 中川乡建筑倒塌

图 1　积石山震区概况:

Fig. 1　Overview Map of the Study Area

步根据外部DEM去除地形相位,获取更准确的同震形变场;(3)采用双极化融合的震前和震中最优差分干涉相位进行震前和震中相干性估计,进一步计算震中、震前相干性差异,根据相干性差异值检测变化区域;(4)采用WSF 2019提取建筑区强度变化检测和相干性变化检测结果,获取震区损毁建筑物分布;(5)使用分辨率为0.3 m的北京三号光学影像验证建筑物损毁检测精确度。

2.1　SAR影像数据

通过不同的收发方式,SAR影像分为单极化、双极化和全极化数据。以水平-水平(HH)和水平-垂直(HV)极化收发方式为例,双极化SAR影像的极化特征可以通过两种极化的后向散射系数向量$\boldsymbol{k}$表示,具体如下:

$$\boldsymbol{k}=[S_{\mathrm{HH}},S_{\mathrm{HV}}]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

式中,S_{HH}表示水平发射水平接收;S_{HV}表示水平发射垂直接收。通过共轭转置可以得到n视的协方差矩阵:

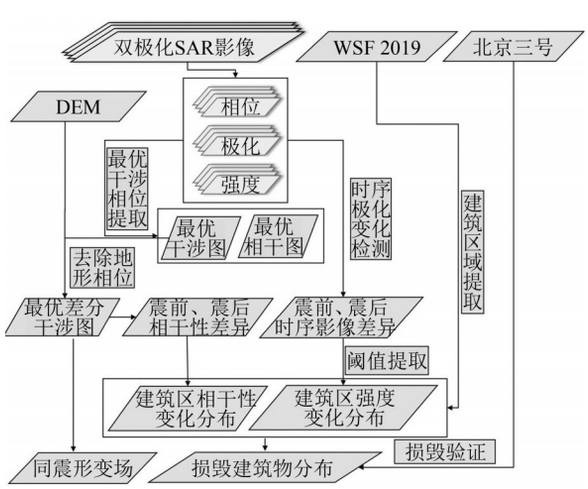


图 2　技术流程图

Fig. 2　Technical Flowchart

$$\boldsymbol{C}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{k}_i\boldsymbol{k}_i^{*\mathrm{T}} \tag{2}$$

双极化协方差矩阵的表达式为:

$$\boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}\langle S_{\mathrm{HH}}S_{\mathrm{HH}}^{*}\rangle & \langle S_{\mathrm{HH}}S_{\mathrm{HV}}^{*}\rangle\\ \langle S_{\mathrm{HV}}S_{\mathrm{HH}}^{*}\rangle & \langle S_{\mathrm{HV}}S_{\mathrm{HV}}^{*}\rangle\end{bmatrix} \tag{3}$$

式中,*表示矩阵共轭;〈•〉表示集合求平均。

2.2 基于假设检验的强度变化检测

本节主要利用SAR影像的强度信息结合似然比检验统计量的方法检测变化信息,在研究k景影像中相同位置像素的变化情况时,将每一幅SAR影像数据中的每一个像素视为独立观测X_t,并考虑独立随机变量$X_t(t=1,2,\cdots,c)$遵循Wishart分布:

$$X_t \sim W_C(p,n,\sum_t), t=1,2,\cdots,c \tag{4}$$

式中,$\sum_t=\sum\{X_t/n\}$;对于全极化数据$p=3$,双极化数据$p=2$,单极化数据$p=1$;n为视数。对于c景极化SAR数据,做出以下H_0假设:

$$H_0:\sum_1=\sum_2=\cdots=\sum_c \tag{5}$$

即认为第1景影像至第c景影像,该位置像素均无变化,对H_1:至少存在有一个n使得$\sum_n\neq\sum_m$使用以下检验统计量Q:

$$Q=c^{pnc}\frac{\prod_{t=1}^{c}|X_t|^n}{|X|^{nc}}=\left\{c^{pc}\frac{\prod_{t=1}^{c}|X_t|}{|X|^c}\right\}^n \tag{6}$$

式中,$|\cdot|$为行列式,独立观测$X_t=n\langle C\rangle_t$遵循复杂的Wishart分布,$X=\sum_{t=1}^{n}\sim W_C(p,nc,\sum)$。并且,在$H_0$条件下,$\sum=X/(cn)$,$Q\in[0,1]$。对于检验统计量,得到[27,35]:

$$\ln Q=n\left\{pc\ln c+\sum_{t=1}^{c}\ln|X_i|-c\ln|X|\right\} \tag{7}$$

且有:

$$f=(c-1)p^2 \tag{8}$$

$$\rho=1-\frac{2p^2-1}{6(c-1)p}\left(\frac{c}{n}-\frac{1}{nc}\right) \tag{9}$$

$$\omega_2=\frac{p^2(p^2-1)}{24\rho^2}\left(\frac{c}{n^2}-\frac{1}{(nc)^2}\right)-\frac{p^2(c-1)}{4}\left(1-\frac{1}{\rho}\right)^2 \tag{10}$$

则得到小于$-2\rho\ln Q$的概率为:

$$P\{-2\rho\ln Q\leqslant z\}\simeq P\{\chi^2(f)\leqslant z\}+\omega_2[P\{\chi^2(f+4)\leqslant z\}-P\{\chi^2(f)\leqslant z\}] \tag{11}$$

式中,z为是否接受假设的临界值,其大小仅由显著性水平α与对应的概率分布两者共同决定;$\chi^2(f)$为自由度为f的卡方分布。计算$-2\rho\ln Q$的概率后,给定显著性水平$\alpha=0.05$得到该假设性检验的拒绝区间,计算每一个像素的$-2\rho\ln Q$是否落在拒绝区间内,若在拒绝域上,则拒绝该假设,即认为该位置发生变化;若未落在拒绝域上,接受该假设,即认为该位置未发生变化。

2.3 合成孔径雷达差分干涉测量同震形变场获取

双极化合成孔径雷达差分干涉测量(differential InSAR,D-InSAR)形变场获取,与常规单极化D-InSAR最大不同之处在于本文采用最优干涉相位提取方法。针对已配准的双极化单视复数(single look complex, SLC)数据,以两个不同时刻、不同通道的极化强度和相位信息为例,构建极化干涉相干矩阵如下:

$$\boldsymbol{Z}=\langle\boldsymbol{K}\boldsymbol{K}^{*\mathrm{T}}\rangle=\begin{bmatrix}\boldsymbol{T}_{ii} & \boldsymbol{\Omega}_{ij}\\ \boldsymbol{\Omega}_{ij}^{*\mathrm{T}} & \boldsymbol{T}_{jj}\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{K}=[\boldsymbol{k}_i,\boldsymbol{k}_j]^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{T}_{ii}=\langle\boldsymbol{k}_i\boldsymbol{k}_i^{*\mathrm{T}}\rangle$和$\boldsymbol{T}_{jj}=\langle\boldsymbol{k}_j\boldsymbol{k}_j^{*\mathrm{T}}\rangle$分别是时刻$i$和$j$的相干矩阵;$\boldsymbol{\Omega}_{ij}(i\neq j)$是极化干涉互相干矩阵。

对应的i和j时刻干涉相位表达式如下:

$$\mathrm{int}f=\left\langle\left(\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{k}_i\right)\left(\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{k}_j\right)^{*\mathrm{T}}\right\rangle=\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\langle\boldsymbol{k}_i\boldsymbol{k}_j\rangle\boldsymbol{\omega}=\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\omega} \tag{13}$$

式中,ω为归一化复投影矢量。干涉相位可由arg(int$f$)获取。

对应的干涉相干估计如下:

$$\gamma(\boldsymbol{\omega})=\left|\gamma_{ij}\right|\mathrm{e}^{i\phi}=\frac{\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}_{ij}\boldsymbol{\omega}}{\sqrt{(\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{ii}\boldsymbol{\omega})(\boldsymbol{\omega}^{*\mathrm{T}}\boldsymbol{T}_{jj}\boldsymbol{\omega})}} \tag{14}$$

分别计算原始极化各通道相干矢量及综合极化特征矢量相干值:各个极化通道相干性为γ^{HH}、γ^{HV};对极化相干值矩阵进行特征值分解后,特征相干值为γ^{SM_1}、γ^{SM_2};进一步利用BEST方法[36]寻找最大相干值:

$$\bar{\gamma}_{\max}=\max(\bar{\gamma}^{SM_1},\bar{\gamma}^{SM_2},\bar{\gamma}^{\mathrm{HH}},\bar{\gamma}^{\mathrm{HV}}) \tag{15}$$

根据最大相干估计提取所对应的干涉相位,进一步进行地形相位去除等常规D-InSAR数据处理,最终获取双极化D-InSAR同震形变场。

2.4 相干性估计检测

相干性是评估两景SAR影像相似性的重要指标,能够体现两个不同时刻的干涉相位受噪声影响的强弱,其取值范围为0~1。由于地表地物发生较大变化(损毁、坍塌)带来的SAR影像量度距离的相位巨变,理论上会出现失相干现象。因此,由地震带来的建筑物损毁可通过失相干现象进行检测。本文采取的建筑物损毁相干性检测方法具体如下:

1)干涉对相干性估计

干涉对相干性估计分别对震前干涉对和同震干涉对进行。为减弱相位梯度变化带来的有偏估计,本文选择对去除地形相位的差分干涉图进行局部统计求得:

$$\hat{\gamma}=\frac{\left|\sum_{l=1}^{L}w(l)P_1(l)P_2^{*}(l)\exp(-j\varphi_l)\right|}{\sqrt{\sum_{l=1}^{L}\left|w(l)P_1(l)P_1^{*}(l)\right|\sum_{l=1}^{L}\left|w(l)P_2(l)P_2^{*}(l)\right|}} \tag{16}$$

式中,L为估计窗口大小;P_1、P_2分别为主影像和辅影像的振幅值;φ为主辅影像的差分干涉相位;$w(l)$为窗口L的第l个像元权重,权重函数采用距离的高斯权重函数。

2)相干性差值检验

为减弱卫星空间定位、植被随机噪声等产生的影响,更准确保留建筑物损毁带来的相干性变化,采用同震干涉对相干性减去震前干涉对相干值:

$$\gamma_{\mathrm{diff}}=\gamma_{\mathrm{co}}-\gamma_{\mathrm{pre}} \tag{17}$$

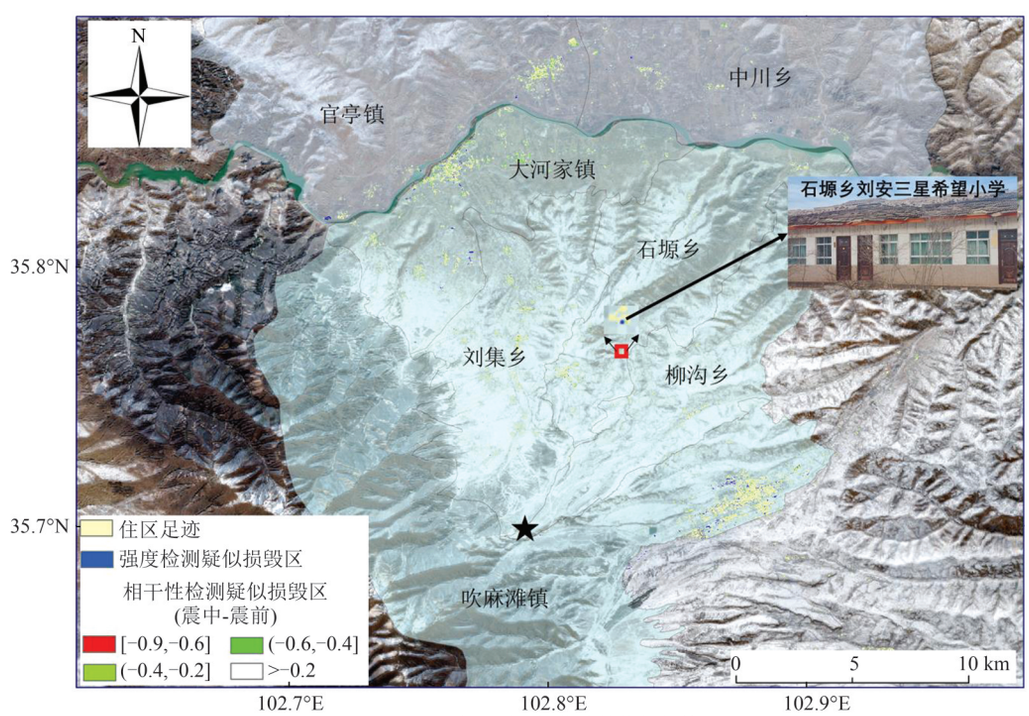
式中,γ_{pre}为震前相干性;γ_{co}为同震相干性;γ_{diff}为相干性差值,取值在-1~1之间。当在建筑物分布区域,$\gamma_{\mathrm{diff}}<0$意味着相干性降低,划定为建筑物损毁区,可进一步根据γ_{diff}降低的量级确定建筑物损毁的等级。

3　实验结果与分析

3.1　单/双极化检测结果分析

3.1.1　强度变化检测

选择表1中震前3景和震后1景数据,采用§2.2方法进行时序SAR影像强度变化检测,经WSF 2019住区足迹掩膜后,得到HH极化、HV极化及融合双极化建筑物损毁结果如图3所示,损毁面积统计如表2所示。统计结果显示融合极化检测损毁面积为0.448 9 km^2,明显大于HH或HV的单极化检测面积,HH极化略大于HV极化检测结果,整体上单极化检测的损毁面积远小于应急管理发布的积石山地震灾情评估结果[37]。



(a) 研究区不同极化建筑物损毁检测



(b) 大河家镇细节对比　(c) 官亭镇细节对比　(d) 吹麻滩镇细节对比

图3　不同极化建筑物损毁检测对比

Fig. 3　Comparison of Building Damage Detection with Different Polarizations

表2 不同极化方式强度变化检测建筑物损毁面积统计/km²

Table 2 Statistics of Building Damage Area Detected by Intensity Changes in Different Polarization Modes/km²

数据类型	官亭镇	中川乡	石塬乡	吹麻滩镇	柳沟乡	刘集乡	大河家镇	合计
HH	0.011 6	0.001 9	0.000 6	0.010 3	0	0.001 0	0.013 4	0.038 8
HV	0.000 4	0	0	0	0	0.000 4	0.000 2	0.001 0
HH+HV	0.065 0	0.031 1	0.014 4	0.196 7	0.007 6	0.020 8	0.113 4	0.448 9

进一步选择如图3所示的官亭镇、大河家镇、吹麻滩镇3个受灾较为严重区域进行细节分析(图3(b)~3(d))。结果表明,单极化SAR影像在受灾较为严重的官亭镇、大河家镇、吹麻滩镇检测出的变化并不明显,HH极化能够检测出部分受损区域,HV极化对变化的检测并不明显,一定程度上验证了同极化通道在对建筑损毁检测中要优于交叉极化通道。双极化SAR影像能够检测出较多的变化信息,证明利用更多极化信息能够有效提高变化检测精度。

为进一步验证双极化信息在变化检测的准确性,本文利用0.3 m分辨率北京三号光学影像进行验证,并对上述区域进行细节对比(图4)。图4中显示,HV交叉极化在3个存在建筑物倒塌的区域检测到的损毁面积为0个像元,同极化HH极化仅在区域3中检测到变化,而双极化影像在区域1~3中分别检测到3、9及48个像元的变化。结果表明,部分区域单极化难以对房屋损毁进行检测,尤其是HV极化,对房屋倒塌检测不敏感,HH极化对房屋倒塌检测效果要优于HV极化。双极化SAR数据能够提供地物的多个极化通道的信息,相比于单极化数据(如HH或HV)能够更好地捕捉到地物的散射特征的变化,高效准确地对房屋损毁进行检测。

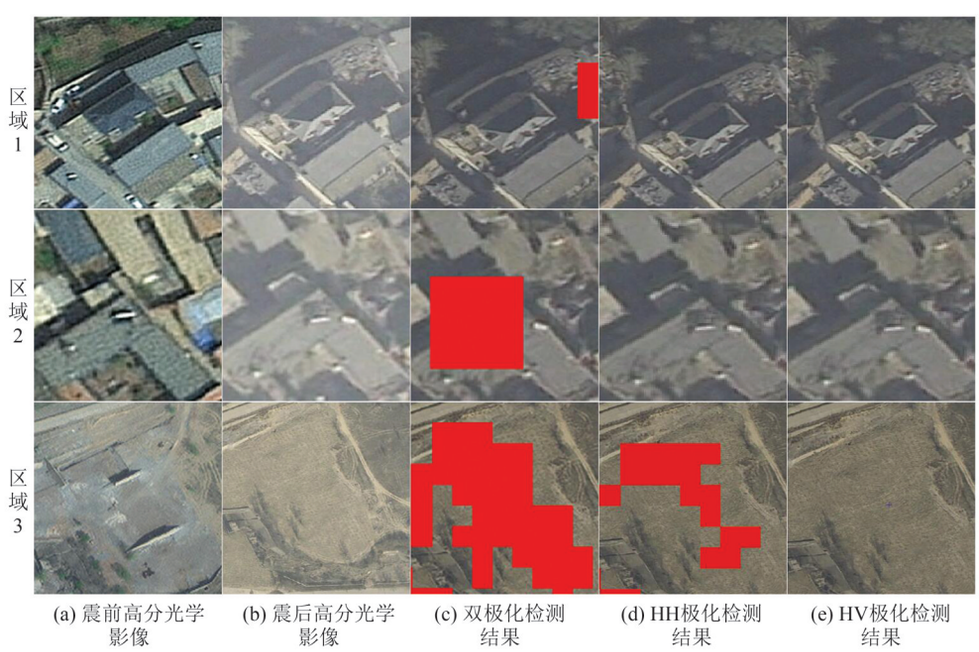


图4 大河家镇3个区域光学影像的不同极化方式房屋损毁检测验证

Fig. 4 Verification of Building Damage Detection Using Different Polarization Modes in Dahejia Town

3.1.2 相干性估计

选择震前2022-02-24及震后2023-12-28同震干涉对进行不同极化相干性分析,HH及HV单极化相干性采用常规D-InSAR处理,相干性估计则基于去除地形相位的对应单极化差分干涉图,采用加权最大似然估计,估计窗口大小为3×3,加权方法为高斯函数,权重随窗口中心的距离增大而减小,结果分别如图5(a)、5(b)所示。融合极化根据§2.3方法获得优化干涉相位,进一步去除地形相位,获取融合差分干涉图,再根据上述相同最大似然估计方法获取融合极化的同震相干图,结果如图5(c)所示。实验结果表明,3种方法获取的相干图整体上表现相似,高低相干值的分布类似,但融合极化在低相干区相干性略高于单极化。

为进一步分析不同极化的优劣,对上述3种方法相干图进行直方图统计,如图5(d)~5(f)所

示。结果表明,融合极化相干性均值最高(0.36),相较于HH及HV单极化,低相干像元数量显著降低,高相干像元数量与HH极化类似,但明显高于HV极化;HV极化相干性均值最低(0.30),低相干像元数量明显高于其他两种方法,高相干像元数量明显低于其他两种方式。整体结果表明,融合极化能够提高低相干区相干性,且保持高相干区相干性。

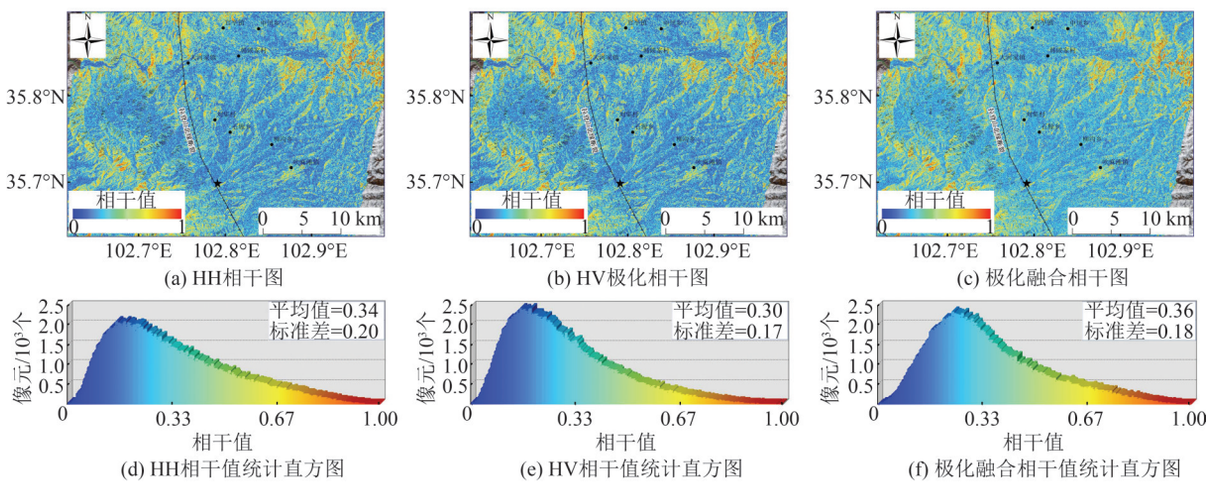


图5　2022-02-24—2023-12-28同震干涉对不同极化相干性对比分析

Fig. 5　Comparison of Coherences of Coseismic (2022-02-24—2023-12-28) Interferogram for Different Polarizations

3.1.3　InSAR同震形变场

针对单极化HH、HV影像,本文采用GAMMA软件[38],利用震前2022-02-24及2023-12-28两景数据采用二轨法获取此次地震同震差分干涉图,去除轨道残差及地形相关大气误差,并进行地理编码(WGS84)后,结果如图6(a)、6(b)所示。融合极化则采用§2.3所述方法生成干涉图,进一步去除地形相位,得到差分干涉图,利用GAMMA软件进行与单极化相同的数据处理方法和步骤,最终获得同震形变结果,如图6(c)所示。

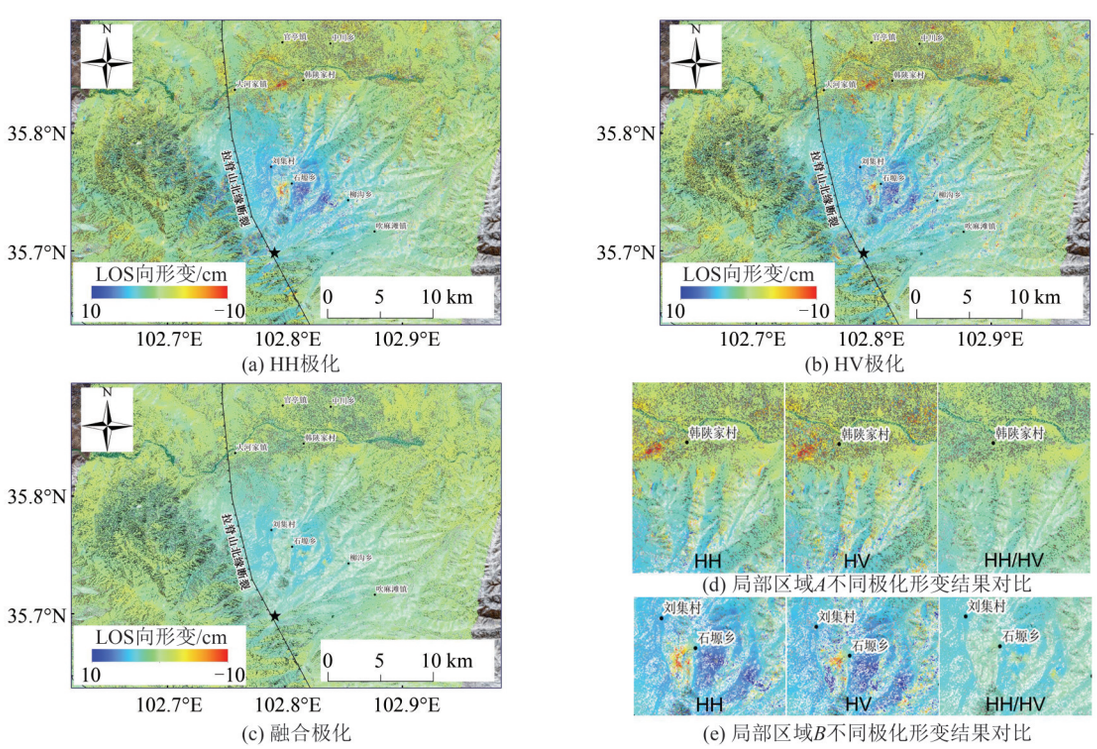


图6　InSAR同震形变场(2022-02-24—2023-12-28)

Fig. 6　InSAR Coseismic Deformation Field(2022-02-24—2023-12-28)

图6(a)~6(c)结果显示,不同极化方法均可获取积石山地震同震形变场,形变区域相同、形变趋势相似,排除HH及HV形变场中心存在可能的相位解缠误差外(图6(e)),基本朝向卫星运动,这与文献[39]采用Sentinel-1降轨监测研究结果类似。图6中所示的拉脊山北缘断裂南北穿越

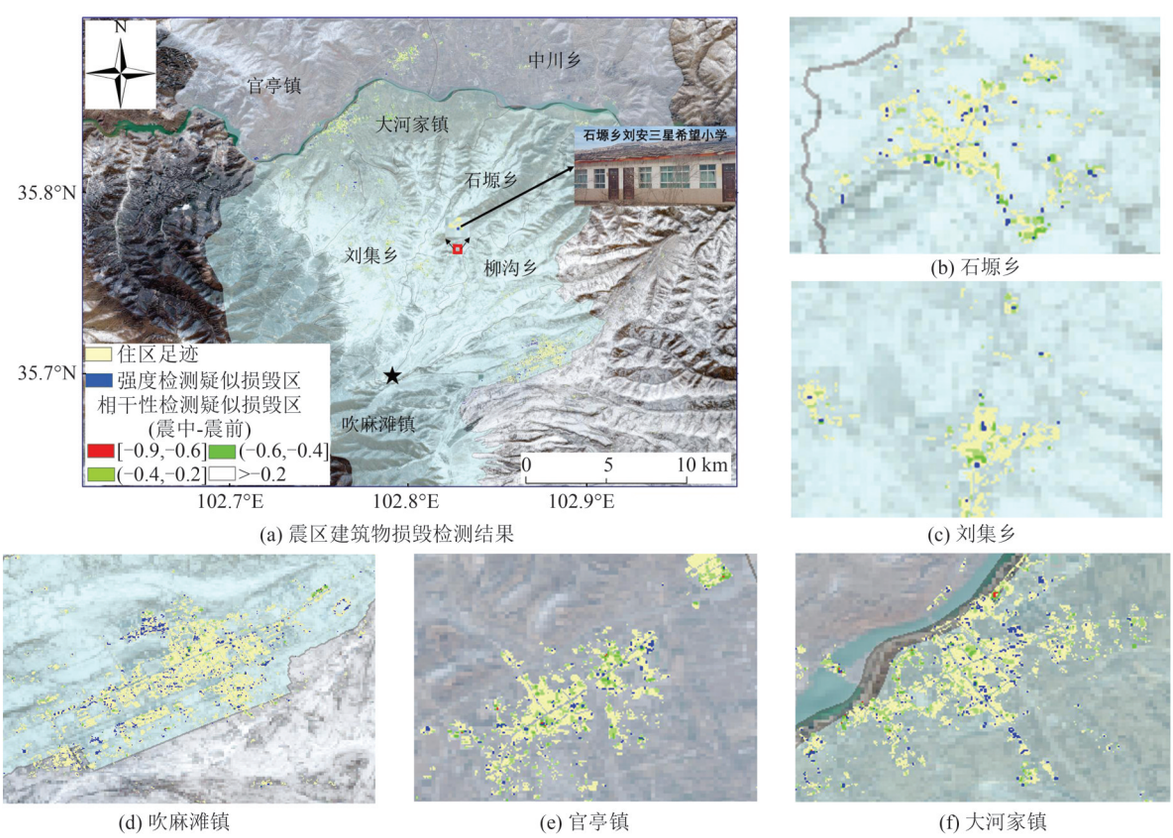
形变区,推测此次地震的发生可能与此断层有关。

尽管3种方法监测结果相似,但同震形变场的形变量级上有明显差异,HH、HV单极化量级明显高于融合极化,视线向(line of sight,LOS)最大形变量为10 cm,融合极化LOS最大形变量为8 cm;对比上述研究Sentinel-1入射角为39.4°降轨结果(6.5 cm)[39],双极化ALOS-2/PALSAR-2相近入射角40.5°结果与其更为接近。另外,通过局部区域对比图6(d)、6(e),融合极化结果更为平滑,解缠误差区域更少,整体上融合极化在同震形变场获取中表现出显著优势。

双极化同震形变场结果表明,形变主要影响范围为甘肃省积石山县的刘集乡、石塬乡、柳沟乡、吹麻滩镇和大河家镇,这比中国地震局发布的地震烈度图确定的受灾范围略小[40]。青海省官亭镇及中川乡位于同震形变场边缘,但仍存在大量建筑物损毁现象,这说明地震同震形变场基本可确定地震受灾最严重区域,但地震对建筑物损坏的影响不局限于同震形变范围内。

3.2 建筑物损毁联合分析验证

考虑到双极化信息能够提升建筑物损毁检测精度,分别利用双极化ALOS-2/PALSAR-2卫星影像强度和相位信息,进行强度及相干性变化检测。强度变化检测利用全部4景SAR影像,采用§2.2描述的基于假设检验的双极化影像强度变化检测方法,得到最终强度变化检测结果,相干性变化检测则采用震前2020-02-27及2022-02-24干涉对和震中2022-02-24及2023-12-20干涉对,采用§2.4描述的双极化相干性变化检测方法,得到最终的相干性变化检测结果。进一步结合建筑物区域分布图获取研究区建筑物损毁检测结果如图7(a)所示,震区影响较大的7个乡镇的建筑物损毁面积统计如表3所示。其中吹麻滩镇损毁面积最大(图7(b)~7(d),表2);距离同震形变中心较远(图6(c))的大河家镇、官亭镇、柳沟乡同样存在不同程度损毁(图7(e)、7(f),表2),其中柳沟乡建筑损毁面积最小。表3结果表明,震区7个乡镇的强度变化检测统计面积均小于相干性变化检测损毁面积,且略大于相干性差值小于−0.4的检测结果,这进一步说明相干性对地表变化更为敏感。



(a) 震区建筑物损毁检测结果 (b) 石塬乡 (c) 刘集乡

(d) 吹麻滩镇 (e) 官亭镇 (f) 大河家镇

图7 基于双极化SAR影像的震区建筑物损毁检测结果

Fig. 7 Building Damage Detection Results Based on Dual-Polarization SAR Images

为了验证强度变化检测和相干性检测在建筑物损毁上的准确度和差异性,选择震前、震后的北京三号影像进行辅助验证,受限于高分辨率影像覆盖范围(图1),本研究主要针对青海省官亭镇和甘肃省大河家镇进行分析和验证,两区域分别选取4个位置进行对比分析,具体结果分别

表 3　双极化相干性检测及强度变化检测建筑物损毁面积统计/km²

Table 3　Statistics of Building Damage Area Using Dual-Polarization Coherence and Intensity Change Detection/km²

检测方法		官亭镇	中川乡	石塬乡	吹麻滩镇	柳沟乡	刘集乡	大河家镇	合计
相干性差值	[−0.8,−0.6)	0.009 70	0.001 0	0.000 0	0.003 1	0.000 0	0.001 2	0.003 1	0.018 1
	[−0.6,−0.4)	0.038 60	0.012 0	0.007 4	0.021 0	0.000 4	0.015 3	0.060 2	0.155 0
	[−0.4,−0.2]	0.017 92	0.070 9	0.046 4	0.146 0	0.012 6	0.086 0	0.290 5	0.831 6
强度变化检测		0.065 00	0.031 1	0.014 4	0.196 7	0.007 6	0.020 8	0.113 4	0.448 9

如图 8、图 9 所示。图 8 结果表明,两种方法均能检测到建筑物损毁(疑似倒塌区),区域 1 的双极化变化检测为 3~4 个像元的变化,且完全包含于相干性变化检测区域内,相干性变化值小于−0.6 的为 2 个像元,[−0.6,−0.4)之间为 9 个像元,[−0.4,−0.2]为 4 个像元,双极化变化检测损毁面积结果介于相干性变化检测的−0.9~−0.4 之间;区域 3 与区域 1 类似,但区域 2、区域 4 表现出两者检测范围的不同,该现象可能与不同地物类型有关。图 9 实验结果表明,两种方法在大河家镇均能检测到建筑物损毁(疑似倒塌区),检测范围与官亭镇区域 1 和 3 类似,相干性变化检测范围大于强度变化检测,同样的,双极化变化检测损毁面积介于相干性变化检测结果(−0.9~−0.4)之间。总体结果表明,时序强度变化检测和相干性检测方法均能检测到建筑损毁,且相干性检测范围多数情况大于强度变化检测,这说明相较于强度,基于相位的相干性检测更为敏感。另外,部分区域两者变化检测结果不一致,可能与地物类型有关,需进一步深入判断。

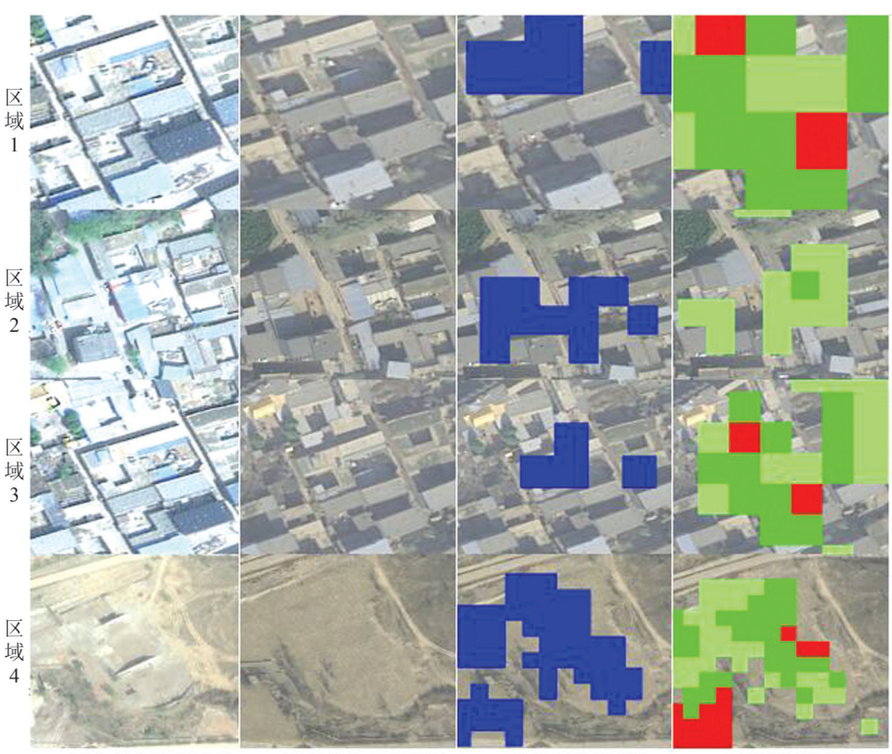


图 8　官亭镇利用光学影像房屋倒塌区验证结果

Fig. 8　Verification Results of Building Damage in Guanting Town

4　结　语

本文利用时序 ALOS-2/PALSAR-2 双极化影像及北京三号高分光学影像对 2023 年积石山地震进行震后建筑物损毁检测和验证,主要结论如下:

1)双极化 SAR 影像在强度变化检测、同震形变场获取及相干性估计表现明显优于单极化数据。具体的,双极化 SAR 强度变化检测能够提取更多的损毁区域;双极化同震干涉在低相干区,干涉相位质量提升明显,有效避免了同震形变场多处解缠误差,最大同震形变量为 8 cm。

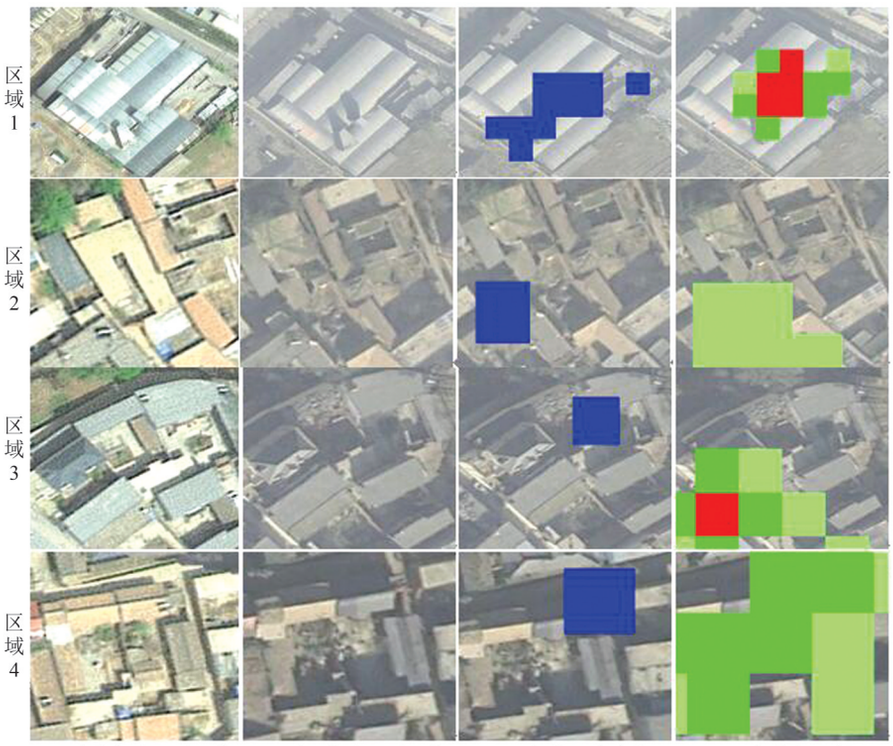


图9 大河家镇利用光学影像房屋倒塌区验证结果

Fig. 9 Verification Results of Building Damage in Dahejia Town

2)经震前、震后北京三号高分光学影像验证,强度变化检测和相干性检测均能够提取建筑物损毁区,两种方法均检测出距震中较近的刘集乡、石塬乡、吹麻滩镇及距离同震形变场边缘的大河家镇和官亭镇存在不同程度建筑物损毁。

3)相较于强度变化检测,相干性检测更为灵敏,检测到的损毁范围和面积更大。

另外,由于缺乏地面真实可靠的验证数据,本文对建筑物损毁检测精度缺少准确的评定,这将是未来工作之一。

致谢:本文ALOS-2/PALSAR-2影像与AW3D 30 DEM数据由日本宇宙航空研究开发机构提供;Sentinel-2光学影像数据由欧洲空间局提供;WSF 2019居民地数据由德国航空航天中心的地球观测中心提供;外业调绘数据由兰州理工大学提供,在此深表感谢!

参 考 文 献

[1] 许强,黄润秋. 5·12汶川大地震诱发大型崩滑灾害动力特征初探[J]. 工程地质学报,2008,16(6):721-729.
XU Qiang, HUANG Runqiu. Kinetics Charateristics of Large Landlides Triggered by May 12th Wenchuan Earthquake[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16(6): 721-729.

[2] 李振洪,朱武,余琛,等. 影像大地测量学发展现状与趋势[J]. 测绘学报,2023,52(11):1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805-1834.

[3] 陈博,宋闯,陈毅,等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,DOI:10.13203/J.whugis20230497.
CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/J.whugis20230497.

[4] 徐岳仁,窦爱霞,李智敏,等. 2023年12月18日甘肃积石山Ms 6.2地震触发次生灾害快速评估[J]. 地震,2024,44(1):209-215.
XU Yueren, DOU Aixia, LI Zhimin, et al. Rapid Assessment of Coseismic Hazards Induced by Jishishan Ms 6.2 Earthquake on December 18, 2023 in Gansu Province, China[J]. *Earthquake*, 2024, 44(1): 209-215.

[5] 薛腾飞. 基于SAR多特征变化检测的震害建筑物提取研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2017.

XUE Tengfei. Earthquake Damaged Buildings Extraction from SAR Images Using Change Detection Technology Based on Multiple Features[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017.

[6] DONG L G, SHAN J. A Comprehensive Review of Earthquake-Induced Building Damage Detection with Remote Sensing Techniques[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 84: 85-99.

[7] BRUNNER D, LEMOINE G, BRUZZONE L. Earthquake Damage Assessment of Buildings Using VHR Optical and SAR Imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(5): 2403-2420.

[8] GE P L, GOKON H, MEGURO K. A Review on Synthetic Aperture Radar-Based Building Damage Assessment in Disasters[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 240: 111693.

[9] SUN W D, SHI L, YANG J, et al. Building Collapse Assessment in Urban Areas Using Texture Information from Postevent SAR Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(8): 3792-3808.

[10] GOKON H, POST J, STEIN E, et al. A Method for Detecting Buildings Destroyed by the 2011 Tohoku Earthquake and Tsunami Using Multitemporal TerraSAR-X Data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(6): 1277-1281.

[11] PLANK S. Rapid Damage Assessment by Means of Multi-Temporal SAR—A Comprehensive Review and Outlook to Sentinel-1[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(6): 4870-4906.

[12] MASSONNET D, ROSSI M, CARMONA C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1993, 364: 138-142.

[13] 朱建军, 李志伟, 胡俊. InSAR变形监测方法与研究进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1717-1733.
ZHU Jianjun, LI Zhiwei, HU Jun. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1717-1733.

[14] 刘如, 王腾. 地表三维同震位移与同震滑坡分布之间的关系研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(7): 1600-1618.
LIU Ru, WANG Teng. The Relationship Between Three-Dimensional Coseismic Displacement and Distribution of Earthquake-Triggered Landslides[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2023, 53(7): 1600-1618.

[15] 张双成,赵颖,张成龙,等. 联合光学遥感和SAR影像青海玛多Ms 7.4地震同震形变场分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024, DOI: 10.13203/j.whugis20220615.
ZHANG Shuangcheng, ZHAO Ying, ZHANG Chenglong, et al. Coseismic Deformation Analysis of Qinghai Maduo Ms 7.4 Earthquake Based on Optical Remote Sensing and SAR Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20220615.

[16] 蒋弥, 丁晓利, 李志伟, 等. 用L波段和C波段SAR数据研究汶川地震的同震形变[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(1): 21-26.
JIANG Mi, DING Xiaoli, LI Zhiwei, et al. Study on Coseismic Deformation of Wenchuan Earthquake by Use of L and C Wavebands of SAR Data[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(1): 21-26.

[17] 李永生,李强,焦其松,等. 陆探一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application and Prospects of Land Exploration SAR Satellite Constellation in the Earthquake Industry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[18] ELGHARBAWI T, ZARZOURA F. Damage Detection Using SAR Coherence Statistical Analysis, Application to Beirut, Lebanon[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 173: 1-9.

[19] KARIMZADEH S, MATSUOKA M, MIYAJIMA M, et al. Sequential SAR Coherence Method for the Monitoring of Buildings in Sarpole-Zahab, Iran[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(8): 1255.

[20] HASANLOU M, SHAH-HOSSEINI R, SEYDI S T, et al. Earthquake Damage Region Detection by Multitemporal Coherence Map Analysis of Radar and Multispectral Imagery[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(6): 1195.

[21] WATANABE M, THAPA R B, OHSUMI T, et al. Detection of Damaged Urban Areas Using Interferometric SAR Coherence Change with PALSAR-2[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 131.

[22] CHO S, XIU H Y, MATSUOKA M. Backscattering Characteristics of SAR Images in Damaged Buildings Due to the 2016 Kumamoto Earthquake[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2181.

[23] CHEN S W, WANG X S, SATO M. Urban Damage Level Mapping Based on Scattering Mecha-

nism Investigation Using Fully Polarimetric SAR Data for the 3.11 East Japan Earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 6919-6929.

[24] KIM M, PARK S E, LEE S J. Detection of Damaged Buildings Using Temporal SAR Data with Different Observation Modes[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(2): 308.

[25] CHEN S W, SATO M. Tsunami Damage Investigation of Built-Up Areas Using Multitemporal Spaceborne Full Polarimetric SAR Images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 1985-1997.

[26] ZHAO J Q, YANG J, LU Z, et al. An Unsupervised Method of Change Detection in Multi-temporal PolSAR Data Using a Test Statistic and an Improved K & I Algorithm [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(12): 1297.

[27] CONRADSEN K, NIELSEN A A, SKRIVER H. Determining the Points of Change in Time Series of Polarimetric SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(5): 3007-3024.

[28] CHEN Q H, YANG H, LI L L, et al. A Novel Statistical Texture Feature for SAR Building Damage Assessment in Different Polarization Modes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2020, 13: 154-165.

[29] JI Y Q, SUMANTYO J T S, CHUA M Y, et al. Earthquake/Tsunami Damage Level Mapping of Urban Areas Using Full Polarimetric SAR Data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(7): 2296-2309.

[30] LINDSEY E O, NATSUAKI R, XU X H, et al. Line-of-Sight Displacement from ALOS-2 Interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 Aftershock [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(16): 6655-6661.

[31] FUJIWARA S, YARAI H, KOBAYASHI T, et al. Small-Displacement Linear Surface Ruptures of the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence Detected by ALOS-2 SAR Interferometry[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 160.

[32] ARCINIEGAS G A, BIJKER W, KERLE N, et al. Coherence- and Amplitude-Based Analysis of Seismogenic Damage in Bam, Iran, Using ENVISAT ASAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1571-1581.

[33] SUN X L, CHEN X, YANG L, et al. Using InSAR and PolSAR to Assess Ground Displacement and Building Damage After a Seismic Event: Case Study of the 2021 Baicheng Earthquake[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(13): 3009.

[34] MARCONCINI M, METZ-MARCONCINI A, ESCH T, et al. Understanding Current Trends in Global Urbanisation—The World Settlement Footprint Suite[J]. *GI_Forum*, 2021, 9(1): 33-38.

[35] ZHAO J Q, CHANG Y L, YANG J, et al. A Novel Change Detection Method Based on Statistical Distribution Characteristics Using Multi-temporal PolSAR Data[J]. *Sensors*, 2020, 20(5): 1508.

[36] ZHAO F, MALLORQUI J J. Coherency Matrix Decomposition-Based Polarimetric Persistent Scatterer Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(10): 7819-7831.

[37] 国家防灾减灾救灾委员会办公室应急管理部发布2023年全国十大自然灾害[EB/OL]. (2024-01-20). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475696.shtml.
Office of the National Disaster Prevention, Mitigation and Relief Committee and the Ministry of Emergency Management Released the Top Ten Natural Disasters in China in 2023 [EB/OL]. (2024-01-20). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202401/t20240120_475696.shtml.

[38] WERNER C, WEGMÜLLER U, STROZZI T, et al. GAMMA SAR and Interferometric Processing Software[C]//ERS-Envisat Symposium, Gothenburg, Sweden, 2000.

[39] 杨九元, 温扬茂, 许才军. InSAR观测揭示的2023年甘肃积石山Ms 6.2地震发震构造[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230501.
YANG Jiuyuan, WEN Yangmao, XU Caijun. Seismogenic Fault Structure of the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake Revealed by InSAR Observations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20230501.

[40] 应急管理部发布甘肃积石山6.2级地震烈度图[EB/OL]. (2023-12-22). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.
Emergency Management Department Issued Jishishan 6.2 Earthquake Intensity Figure in Gansu [EB/OL]. (2023-12-22). https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202312/t20231222_472849.shtml.