



武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 联合光学遥感和 SAR 影像青海玛多 Ms7.4 级地震同震形变场分析
作者: 张双成, 赵颖, 张成龙, 张菊清, 樊茜佑, 司锦钊, 张雅斐, 朱武, 李振洪
DOI: 10.13203/j.whugis20220615
收稿日期: 2023-06-04
网络首发日期: 2023-06-28
引用格式: 张双成, 赵颖, 张成龙, 张菊清, 樊茜佑, 司锦钊, 张雅斐, 朱武, 李振洪. 联合光学遥感和 SAR 影像青海玛多 Ms7.4 级地震同震形变场分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220615>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220615

引用格式：

张双成, 赵颖, 张成龙, 等. 联合光学遥感和SAR影像青海玛多Ms7.4级地震同震形变场分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220615 (ZHANG Shuangcheng, ZHAO Ying, ZHANG Chenglong, et al. Co-seismic Deformation Analysis of Qinghai Maduo Ms7.4 Earthquake Based on Optical Remote Sensing and SAR Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220615)

联合光学遥感和 SAR 影像青海玛多 Ms7.4 级地震

同震形变场分析

张双成^{1,2,3}, 赵颖¹, 张成龙¹, 张菊清^{1,2,3}, 樊茜佑¹, 司锦钊¹, 张雅斐¹,
朱武^{1,2,3}, 李振洪^{1,2,3}

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 长安大学地学与卫星大数据研究中心, 陕西 西安, 710054

3 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安, 710054

摘要：2021年5月22日青海省果洛藏族自治州玛多县发生Ms7.4级地震，作为近年来少有的发生在巴颜喀拉块体内部的强震，研究其同震形变场特征是十分必要的。本文收集了玛多地震前后 Sentinel-2 和 Landsat8 影像，利用光学像素偏移量跟踪技术获得了该地震东西向和南北向形变；基于地震前后 Sentinel-1 升降轨影像，利用 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术获取了该地震升降轨雷达视线向 (Line of Sight, LOS) 形变，利用 SAR 像素偏移量跟踪技术获得该地震距离向和方位向形变，联合解算得到其三维同震形变场，最后对提取的同震形变场结果进行对比交叉验证。结果表明：此次玛多地震为左旋走滑型地震，同震形变以东西向水平运动为主，发震断裂为江错断裂。基于光学遥感影像，得到该地震东西向和南北向形变大约集中在-1.60m~1.60m和-0.60m~0.60m；基于 SAR 影像，得到升轨最大 LOS 向抬升和沉降量约为 1.29m 和-1.12m，降轨最大 LOS 向抬升和沉降量约为 1.15m 和-1.26m；解算的三维同震形变场中，东西向形变约为-2.00m~1.70m，南北向形变主要集中-1.00m~0.50m，垂直向上沿断裂带两侧呈升降交替运动，形变约在-0.30m~0.30m 之间。地震北侧形变量级相较于南侧更大，得到的地表破裂带长约 176km，在东南末端(34.48° N, 99.04° E)和西北末端(34.76° N, 97.61° E)，以及西段鄂陵湖南侧(34.74° N, 97.75° E)存在分支破裂。基于光学遥感和 SAR 影像提取的玛多地震同震形变场具有一致特征，且多平台、多技术为获取该地震完整同震形变场补充了更多地表破裂带分支等特征，该研究为光

收稿日期：2023-06-04

项目资助：国家自然科学基金(42074041)；国家重点研发计划项目(2020YFC1512000, 2019YFC1509802)；地理信息工程国家重点实验室基金(SKLGIE2022-ZZZ-07)；陕西省科技创新团队项目(2021TD-51)；欧洲空间局-科技部国家遥感中心龙计划5项目(59339)。

第一作者：张双成，副教授，博导，主要从事卫星导航与定位、GNSS 遥感、地质灾害监测预警等研究。

E-mail:shuangcheng369@chd.edu.cn

通讯作者：张双成，副教授，博导，主要从事卫星导航与定位、GNSS 遥感、地质灾害监测预警等研究。

E-mail:shuangcheng369@chd.edu.cn

学遥感和 SAR 影像在地震同震形变监测中的应用提供一些参考。

关键词: 玛多地震; 光学遥感影像; SAR 影像; 像素偏移量跟踪; InSAR

Co-seismic Deformation Analysis of Qinghai Maduo Ms7.4 Earthquake Based on Optical Remote Sensing and SAR Images

ZHANG Shuangcheng^{1,2,3} ZHAO Ying¹ ZHANG Chenglong¹ ZHANG Juqing^{1,2,3}

FAN Qianyou¹ SI Jinzhao¹ ZHANG Yafei¹ ZHU Wu^{1,2,3} LI Zhenhong^{1,2,3}

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China

3 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

Abstract: objectives: The Ms7.4 earthquake occurred in Maduo, Qinghai Province on May 22, 2021, which is a rare powerful earthquake that occurred in Bayan Har block in recent years, it is essential to study the characteristics of its co-seismic deformation field.

Method: Based on sentinel-2 and Landsat8 images before and after Maduo earthquake, East-West and South-North two-dimensional co-seismic deformation fields were obtained by optical Pixel Offset Tracking. InSAR was utilized to obtain LOS co-seismic deformation based on Sentinel-1 ascending and descending images, and SAR Pixel Offset Tracking was utilized to obtain range and azimuth directions co-seismic deformation of the earthquake, meanwhile, 3D co-seismic deformation field of this earthquake is calculated, moreover, the results of co-seismic deformation field extracted are compared and verified. **Results:** The experimental results show that: co-seismic deformation field characteristics of Maduo earthquake based on optical and SAR images are great consistent. Maduo earthquake is a typical left-lateral strike-slip event, the co-seismic deformation is dominated by East-West horizontal movements, and the seismogenic fault is Jiangcuo fault. Based on optical images, it is obtained that East-West and North-South deformation of the earthquake are about $\pm 1.60\text{m}$ and $\pm 0.60\text{m}$. Based on SAR images, the maximum LOS uplift and subsidence of ascending are about 1.29m and -1.12m , and descending are about 1.15m and -1.26m . In the 3D co-seismic deformation field, the East-West deformation is about -2.00m to 1.70m , North-South deformation is mainly concentrated in -1.00m to 0.50m , and it moves alternately up and down along both sides of the fault zone in Vertical direction, the deformation is about $\pm 0.3\text{m}$. The magnitude of deformation values on north side of the earthquake is larger than that on south side. Branch ruptures are shown at the end of the

Southeast(34.48° N, 99.04° E) and Northwest(34.76° N, 97.61° E) of the surface rupture, and South side of Eling Lake (34.74° N, 97.75° E), and aftershock sequence is distributed near these branch ruptures. **Conclusion:** InSAR and Pixel Offset Tracking technology complement each other, which provides an effective way to obtain the complete co-seismic deformation field, and multi-platform, high-resolution optical and SAR images provide important datasets.

Key words: Maduo Earthquake; Optical Remote Sensing Image; SAR Image; Pixel Offset Tracking; InSAR

2021年5月22日2时4分,青海省果洛藏族自治州玛多县发生 $M_s7.4$ 级地震,震中(34.59° N, 98.34° E)位于巴颜喀拉块体北部,是汶川地震之后中国发生震级最高的一次地震(<http://www.ceic.ac.cn/>)。地震常常造成严重的建筑物破坏及人员伤亡,据报道此次地震造成青海果洛藏族自治州7个县40个乡镇35521人受灾,同时造成部分房屋受损,交通干道变形塌陷,严重威胁人民群众的生命和财产安全。对地震灾情信息的快速获取是做好抗震救灾工作的关键,而地震同震形变场监测是其中必不可少的一环,地震同震形变场的获取是研究地震发生机制、地震参数反演、确定发震断层几何特征和运动性质的必要基础,对于揭示研究区域构造变形强度机制,防止次生地质灾害发生具有重要意义。

遥感技术的快速发展,使其成为震害监测十分可靠有效的手段。相较于传统水准测量和GNSS(Global Navigation Satellite System)技术对离散点形变监测,InSAR技术能够全天时、全天候、高精度、大范围地获取连续面的地表形变,对监测大面积受灾区域具有巨大优势^[1],在地震同震形变监测中发挥着无可替代的作用。但是InSAR技术最大只能监测出相邻像元间低于半波长的形变^[2],在地震近断裂带区域形变量超出最大形变梯度时,容易产生失相干现象,导致无法获取准确的形变量。针对该问题,许多学者利用基于影像幅度信息的像素偏移量跟踪技术来弥补InSAR技术这一缺陷^[3],例如Elliott等利用SAR像素偏移量跟踪技术得到了2002年Denali地震的同震形变^[4];Fialko Y等基于Envisat卫星升降轨数据,利用InSAR技术和SAR像素偏移量跟踪技术获取了Bam地震的完整地表形变场^[5];而基于光学遥感影像的像素偏移量跟踪技术也在Izmit地震^[6]、Rudbar地震^[7]、Kaikoura地震^[8]等取得了可靠同震形变结果。事实证明,像素偏移量跟踪技术能够在InSAR技术严重失相干区域获取准确的形变信息,在形变量大且具有突变性的地震、滑坡、冰川等地质灾害监测中是一种非常有效的方法^[9]。该技术获取形变的精度主要取决于影像的空间分辨率^[10],如今高空间分辨率SAR卫星和光学遥感卫星的发展为其提供了重要数据保障。

对于玛多地震,许多学者利用SAR影像和GNSS数据进行该地震同震形变及发震构造研究^[11,12],而基于光学遥感影像数据的研究较少。本文首先基于青海玛

多地震前后 Sentinel-2 和 Landsat8 影像,采用光学像素偏移量跟踪技术,分别获得了该地震东西向和南北向二维形变场,并对形变结果中的误差源进行分析与改正;然后基于地震前后的 Sentinel-1 升降轨影像,采用 InSAR 技术获取了该地震升降轨 LOS 向形变,又采用 SAR 像素偏移量跟踪技术得到了该地震距离向和方位向形变;最后联合光学遥感影像和 SAR 影像解算了玛多地震三维同震形变场,并对形变结果进行交叉对比验证,分析该地震完整地表同震形变场特征,进一步证明光学遥感影像和 SAR 影像在地震同震形变监测中的可行性和重要性。

1 研究区与数据

青藏高原位于喜马拉雅山脉以北,是印度板块与欧亚板块向北持续碰撞和挤压的结果,强烈的地质构造活动孕育了柴达木块体、巴颜喀拉块体、羌塘块体和拉萨块体等多个板内次级断块^[13]。我国 $M_s7.0$ 级浅源地震主要集中发生在青藏高原中部巴颜喀拉块体^[14]。巴颜喀拉块体在地貌上呈西部狭长,东侧张开的倒三角形态^[15],北部东昆仑断裂带和南部甘孜-玉树断裂带均是巨型左旋走滑型活动断裂,东部是右旋走滑逆冲型的龙门山断裂带和岷江断裂带,西部为阿尔金断裂带西南段尾端张性断层,是一条走滑拉张边界^[14],块体边界主要为走滑型断裂带,走滑型地震是该区域主体地震,印度板块向北长期强烈俯冲推挤产生的应力应变积累是孕育这些边界断裂带发生强震的重要条件^[16]。自 1995 年以来,巴颜喀拉块体边界发生多次 $M_s7.0$ 级以上的中强地震,如 2001 年北部边界发生的昆仑山口地震^[17],2011 年南部边界发生的玉树地震^[18],东部边界发生的 2008 年汶川地震^[19]、2013 年庐山地震^[20]和 2017 年九寨沟地震^[21],此次玛多 $M_s7.4$ 地震发生在巴颜喀拉块体北部,是近年来少有的发生在该块体内部的强震^[22](图 1(a))。巴颜喀拉块体北部东昆仑断裂带以南发育了一系列次级活动断裂,由北向南有玛多-甘德断裂、江错断裂、甘德南缘断裂和达日断裂等(图 1(b)),构成了该块体由西向东逐渐宽阔的“马尾状”断裂带^[23]。众多研究成果表明,玛多地震的发震断裂为江错断裂,地表破裂特征主要体现为一系列雁行状张裂隙、剪切裂缝、以及挤压隆起、裂陷等,表现为显著的左旋走滑运动性质^[23,24]。玛多地震的发生说明巴颜喀拉块体构造活动仍在持续,作为青藏高原地震活动高发区具有重要研究价值。

本文收集了欧空局 Sentinel-2 和美国陆地卫星计划 Landsat8 两种光学遥感影像。Sentinel-2 卫星任务包含 Sentinel-2A 和 Sentinel-2B 两颗卫星,可提供空间分辨率为 10m、20m 和 60m 的光学影像,两颗卫星同时运行可将重访周期由 10 天减少为 5 天。玛多地震前后多为雨雪天气,光学影像质量受天气状况影响较大,所以本文从欧空局官网获取了 2020 年 6 月 24 日和 9 月 2 日两景震前 Sentinel-2 影像、2021 年 6 月 9 日和 7 月 19 日两景震后 Sentinel-2 影像,所选影像对时间跨度近一年,且在主震形变区域云覆盖量较少。相较于 Sentinel-2 卫星, Landsat8 卫星每 16 天

实现一次全球覆盖,提供 15m 和 30m 空间分辨率的光学影像。本文从 USGS(United States Geological Survey) 网站下载了 2020 年 9 月 17 日和 2021 年 7 月 18 日两景地震前后影像, Landsat8 影像整体云覆盖量较小, 不到 2%, 所选影像对时间跨度和 Sentinel-2 影像保持一致(表 1 和图 1 (b))。另外, Sentinel-2 影像 10m 分辨率的有可见光波段 Band2、Band3 和 Band4, 以及近红外波段 Band8, 研究表明 Band8 影像在像素偏移量跟踪算法中表现出的结果最好^[25]。因此, 本文对于 Sentinel-2 影像选取了 Band8 进行像素偏移量跟踪计算, 而 Landsat8 卫星选取了较高空间分辨率 15m 的全色波段 Band8 进行像素偏移量跟踪计算。

表 1 研究区光学遥感影像信息

Tab. 1 Optical Remote Sensing Images Information Covering the Study Area

影像日期	卫星	太阳高度角(°)	太阳方位角(°)	含云量 (%)	拼接域编号	波段 (分辨率)	距主震 (天)
20200917	Landsat8	52.63	146.16	0.090	-	Band8(15m)	247
20210702	Landsat8	67.39	114.92	1.540	-	Band8(15m)	57
20200624	Sentinel-2B	19.69	120.22	4.143	T47SLU	Band8(10m)	
20200624	Sentinel-2B	18.94	122.17	3.560	T47SMU	Band8(10m)	332
20200624	Sentinel-2B	18.19	124.23	2.863	T47SNU	Band8(10m)	
20200902	Sentinel-2B	31.54	144.67	0.006	T47SLU	Band8(10m)	
20200902	Sentinel-2B	31.05	146.50	0.008	T47SMU	Band8(10m)	262
20200902	Sentinel-2B	30.57	148.37	0.044	T47SNU	Band8(10m)	
20210609	Sentinel-2B	19.42	122.69	11.996	T47SLU	Band8(10m)	
20210609	Sentinel-2B	18.69	124.75	7.231	T47SMU	Band8(10m)	18
20210609	Sentinel-2B	17.97	126.94	6.682	T47SNU	Band8(10m)	
20210719	Sentinel-2B	22.07	124.05	2.931	T47SLU	Band8(10m)	
20210719	Sentinel-2B	21.35	125.96	4.106	T47SMU	Band8(10m)	58
20210719	Sentinel-2B	20.64	127.96	7.130	T47SNU	Band8(10m)	

本文所用的 SAR 影像为欧空局 C 波段 Sentinel-1 卫星影像, 该卫星单星重访周期为 12 天, Sentinel-1A 与 Sentinel-1B 卫星协同观测重访周期为 6 天, 但遗憾的

是2021年12月23日 Sentinel-1B 卫星因出现故障无法再提供雷达影像。文中共收集了青海玛多地震主震前后两对升降轨 IW (Interferometric Wide-Swath Mode) Sentinel-1 影像, 其中震前为2021年5月20日的 Sentinel-1A 影像, 震后为2021年5月26日的 Sentinel-1B 影像(表2和图1(b))。同时还收集了欧空局提供的DORIS 精密轨道文件以及 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 30m 分辨率的 DEM (Digital Elevation Model) 数据。

表2 研究区 SAR 影像信息

Tab. 2 SAR Images Information Covering the Study Area

影像日期	卫星	升/降轨	轨道编号	垂直基线 (m)	入射角 (°)	方位角 (°)	时间间隔 (天)
20210520	Sentinel-1A	升轨	99	53	33.8	-12.9	6
20210526	Sentinel-1B	升轨					
20210520	Sentinel-1A	降轨	106	111	39.5	193.0	6
20210526	Sentinel-1B	降轨					

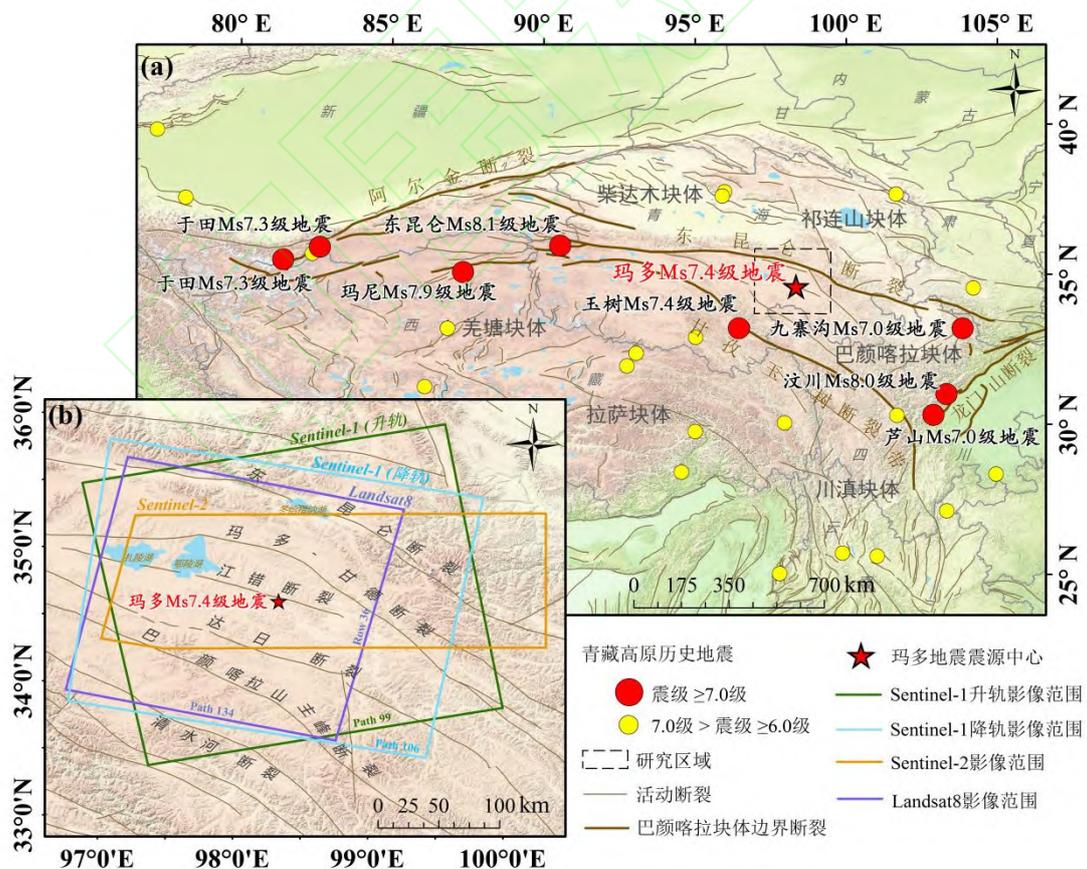


图1 青海玛多地震区域环境构造背景

Fig.1 Environmental Tectonic Setting of Maduo Earthquake in Qinghai

2 数据处理方法

2.1 光学遥感影像数据处理

光学遥感影像数据处理使用的是美国加州理工学院在 ENVI 软件开发的 COSI-CORR (the Coregistration of Optical Sensed Images and Correlation) 模块, 它可以实现两景光学遥感影像亚像素相关性计算, 获取影像事件前后东西向和南北向形变, 该模块主要包括统计相关算法和频率相关算法。统计相关算法最大化相关系数的绝对值, 算法粗糙但稳健; 频率相关算法是基于傅里叶偏移理论在频率域内采用相位相关技术进行匹配计算, 相较于统计相关算法更精确^[26]。因此, 本文采用频率相关算法来提取玛多地震东西向和南北向同震形变场。首先对 Sentinel-2 影像完成拼接使其覆盖研究区域, 然后在 COSI-CORR 软件频率相关器中^[27], 初始滑动窗口和最终滑动窗口均设置为 128×128 像素, 较大的滑动窗口尺寸能够获得更准确的位移, 迭代次数设置为 2, 掩膜阈值设置为 0.95, 为使两种影像地面分辨率保持一致, 最终能够获得相似分辨率的同震形变结果, Sentinel-2 和 Landsat8 影像移动步长分别设置为 9×9 像素和 6×6 像素^[25]。

光学像素偏移量跟踪技术获取地表形变时的误差来源主要包括轨道趋势误差、条带误差、卫星姿态角误差、地形阴影误差和失相干噪声等^[28]。针对本文中光学像素偏移量形变结果中的误差源, 为保证形变结果精度, 需要对各种误差进行后处理。首先对于轨道趋势误差, 采用一次多项式曲面拟合模型进行去除^[29]; 对于失相干噪声误差, 在数据处理过程中通过设置信噪比 SNR (Signal-to-Noise Ratio) 阈值 (0.95) 来掩膜形变场中低于该阈值的区域, 从而剔除由于失相干带来的高异常值; 在 Sentinel-2 影像获取的东西向和南北向形变结果中出现明显沿着轨道运行方向均匀分布的线性信号即条带误差, 以及影像拼接所产生的误差, 本文均采用传统的均值相减法来去除^[30]; 而对于卫星姿态角误差, 采用基于稳定区域的改进的均值相减法进行去除^[25,31]; 最后通过中值滤波对形变结果进行进一步降噪处理, 得到地震东西向和南北向二维同震形变场。误差去除前后对比结果如图 2 所示。由于 Landsat8 影像处理过程中没有出现明显的条带误差, 对于 Landsat8 影像完成了轨道趋势误差、卫星姿态角误差和失相干噪声去除, 以及中值滤波处理。值得注意的是, 光学像素偏移量跟踪结果存在地形阴影误差, 在单一影像对且研究区域地势起伏不大时, 该误差可以忽略, 在有较多影像对时, 可选取多个具有高相似地形阴影误差的影像对实现对该误差的掩膜处理^[32]。

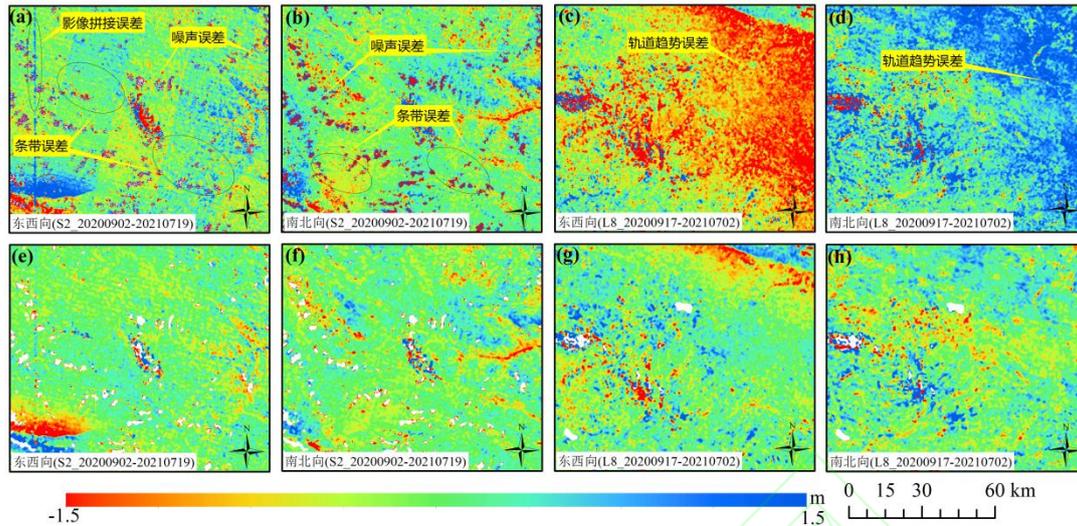


图 2 光学像素偏移量结果误差去除前后对比图

Fig.2 Comparison of Optical Pixel Offset Tracking Results Before and After Error Removal

(a) 和 (b) 是 Sentinel-2 影像 (20200902-20210719) 东西向、南北向去除轨道趋势误差后初步结果; (e) 和 (f) 为去除条带误差、影像拼接误差、卫星姿态角误差和失相干噪声后的结果。(c) 和 (d) 是 Landsat8 影像 (20200917-20210702) 东西向、南北向初步结果; (g) 和 (h) 为去除轨道趋势误差、卫星姿态角误差和失相干噪声后的结果

2.2 SAR 影像数据处理

本文利用 GAMMA 软件对 SAR 影像进行数据处理^[33], 主要包括两部分, 一是采用 InSAR 技术提取地震升降轨 LOS 向同震形变场; 二是采用像素偏移量跟踪技术获取地震距离向和方位向二维形变场。

InSAR 数据处理中, 采用二轨法对地震前后 Sentinel-1 影像进行差分干涉, 首先对影像拼接裁剪使其覆盖研究区域, 通过迭代强度匹配和频谱差异方法实现主 (震前) 从 (震后) 影像的粗配准和精配准^[34], 处理过程中对影像进行多视处理 (10:2) 实现降噪, 利用 SRTM DEM 和精密轨道数据消除干涉相位中的地形相位和平地效应, 然后基于局部条纹频谱对干涉图进行自适应滤波处理^[35], 减少相位噪声, 对低相干区域设置阈值(0.3)进行掩膜, 采用最小费用流(Minimum Coat Flow, MCF)完成相位解缠^[36], 利用 GACOS (Generic Atmospheric Correction Online Service) 进行大气校正^[37,38], 获得地表真实相位, 最后将相位值转换成位移值并完成地理编码, 得到玛多地震升降轨 LOS 向同震形变场。

在进行 SAR 像素偏移量跟踪处理时, 采用强度信息跟踪法来确定主从影像在距离向和方位向上的偏移量^[39]。首先基于 InSAR 预处理中配准完成的 Sentinel-1 单视复数影像进行去斜处理^[40]; 然后在 GAMMA 软件偏移量跟踪程序中设置搜索窗口大小 300×60 像素, 移动步长 20×4 像素, 互相干阈值设为 0.1^[41], 考虑结果精度和计算效率设置过采样因子为 2^[42], 搜索主从影像之间最大互相关系数, 计算

对应像素之间的偏移量^[43]，并结合外部 DEM 数据，采用最小二乘拟合去除由于卫星轨道和成像姿态差异引起的轨道偏移量；最后将得到的地表形变偏移量结果进行中值滤波，地理编码后获得玛多地震距离向和方位向二维同震形变场。

本文在完成上述操作后，采用加权最小二乘解算玛多地震地表三维同震形变^[8]。根据 SAR 影像成像几何关系，建立提取的形变矢量与地表三维形变矢量的关系，以形变场远场区域均方误差作为权重，基于最小二乘准则，解算得到玛多地震地表三维形变的最佳估计值。

3 结果与分析

3.1 光学影像同震形变分析

基于玛多地震前后 Sentinel-2 和 Landsat8 影像，利用光学像素偏移量跟踪技术，分别得到该地震东西向和南北向形变场（图 3）。不论 Sentinel-2 还是 Landsat8 影像，其东西向形变场显示出玛多地震震北向西、震南向东运动，表现为左旋走滑特征，南北向形变场显示出震区震北向北、震南向南运动，同时提取到该地震地表破裂带长约 161km，破裂带东南和西北两侧末端表现出分叉破裂。图 3（a）和（d）对距离地震发生后时间间隔最短的 Sentinel-2 影像（20200624-20210609）所提取的同震形变区域（黑色虚线）形变值进行统计，发现在地震北侧，距震源中心东西两侧存在两块较大形变区域，向西形变量集中在 0.80m~1.60m，这两块形变区域外，该地震北侧向西水平位移量整体约为 0.20m~0.60m；在地震南侧，存在西部、中部和东部三块明显形变区域，形变值集中在 0.60m~1.60m，该地震南侧向东水平位移量整体约为 0.40m~1.20m；而对于南北向形变，其形变量级较小，形变量主体范围在 -0.60m~0.60m 之间；玛多地震同震形变主要以东西向水平运动为主，且地震北侧相较于南侧形变量级更大。本文选取的两对 Sentinel-2 影像结果显示，距离震后 58 天（20200719）相比距离震后 18 天（20200609）的像素偏移量跟踪结果形变量明显减小（图 3（a）和（b）、图 3（d）和（e）），这可能和震后的上千次余震相关。

在利用光学像素偏移量跟踪技术获取玛多地震同震形变时，Sentinel-2 影像对 20200902-20210719 和 Landsat8 影像对 20200917-20210702 获取时间最为接近，因此基于这两组影像对 Sentinel-2 和 Landsat8 影像的同震形变结果进行对比验证。图 3（b）、3（c）、3（e）和 3（f）分别是基于这两组影像的光学像素偏移量跟踪结果，图 3（g）和（h）分别为这两组影像形变场区域（黑色虚线）东西向和南北向形变差值。对图中形变值统计分析，可见在地震形变区域 Landsat8 影像的像素偏移量跟踪结果其高异常值多于 Sentinel-2 影像，主要原因为 Sentinel-2 影像比 Landsat8 影像空间分辨率高；两种影像获取的形变值基本一致，东西向和南北向的形变差值平均值分别为 -0.16m 和 -0.14m，标准差分别为 0.94m 和 0.81m，在影像失

相干区域边界处形变差值较大。另外，对这两种光学遥感影像获得的形变结果稳定区域（图 3 黑色实线）形变值进行了分析（表 3），可以看出东西向形变结果优于南北向，平均值均较小，而标准差显示出 Landsat8 影像像素偏移量跟踪结果相较于 Sentinel-2 影像更好，表明在本文所选稳定区域 Sentinel-2 像素偏移量跟踪结果高异常值较多，经检查发现可能原因是所选区域在 Sentinel-2 震后影像（表 1：20210719 影像）云覆盖量（4.106%）较 Landsat8 震后影像（表 1：20210702 影像）云覆盖量（1.540%）更大，导致基于地震前后光学遥感影像的像素偏移量跟踪结果受云覆盖影响误差较大，从而有更多的高异常值。

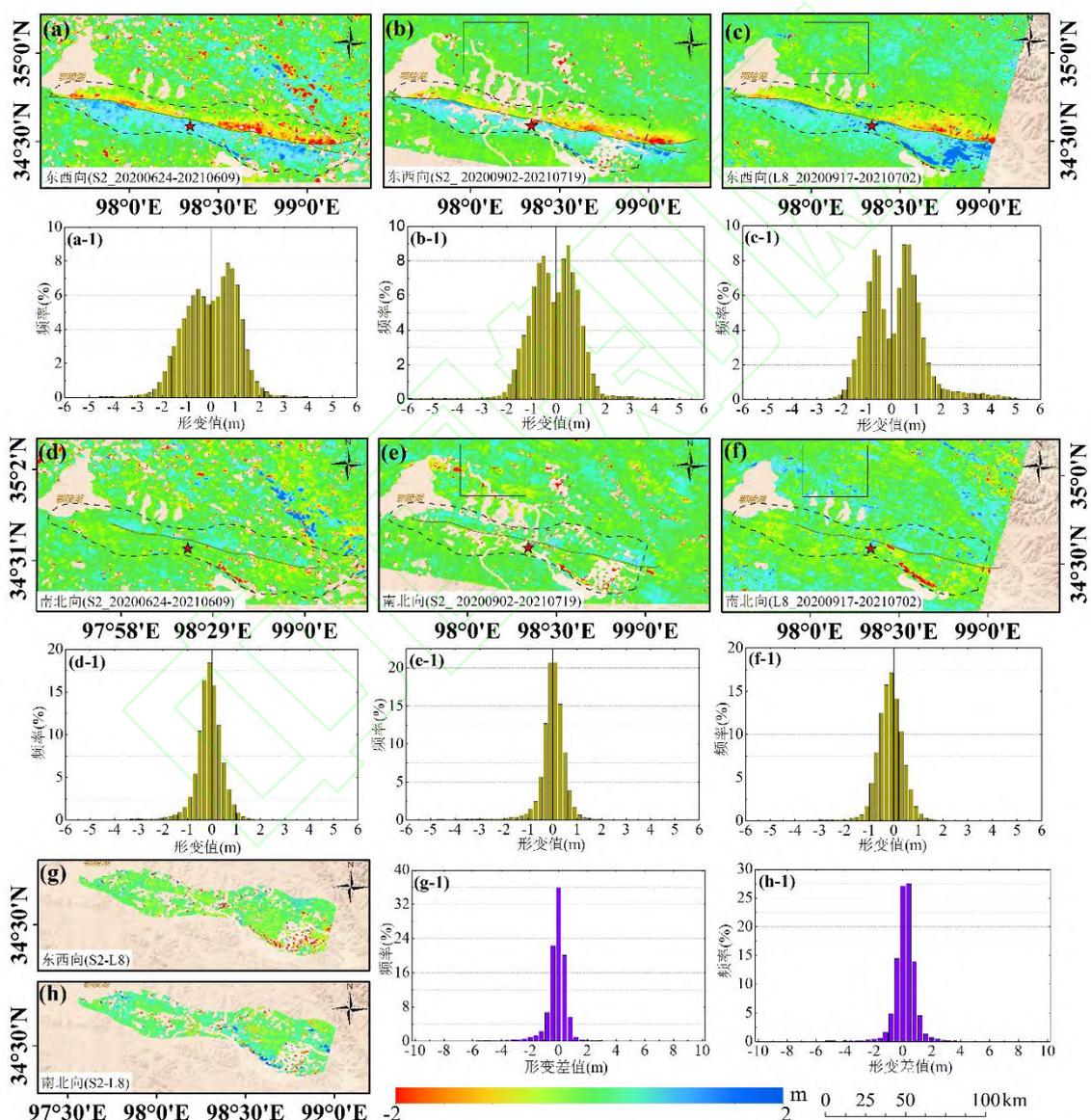


图 3 基于 Sentinel-2 和 Landsat8 影像的玛多地震同震形变场
 Fig.3 Co-seismic Deformation Field of Maduo Earthquake Based on Sentinel-2 and Landsat8 Images

(a) 和 (b)、(d) 和 (e) 是基于 Sentinel-2 影像的东西向、南北向同震形变场；(c) 和 (f) 是基于 Landsat8

影像的东西向、南北向同震形变场；(g)和(h)是 Sentinel-2 影像（20200902-20210719）和 Landsat8 影像（20200917-20210702）东西向、南北向形变对比。图（a-1）等为形变区域（黑色虚线）形变值频率分布，黑色实线区域为稳定区域；图中正值表示向东、向北运动，负值表示向西、向南运动

表 3 Sentinel-2 与 Landsat8 影像的像素偏移量跟踪结果对比验证(m)

Tab. 3 Comparison of Pixel Offset Tracking Results between Sentinel-2 and Landsat8 images (m)

形变 方向	Sentinel-2 稳定区域		Landsat8 稳定区域		形变区域差值	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
东西向	-0.03	0.39	-0.05	0.34	-0.16	0.94
南北向	-0.09	0.58	0.06	0.46	-0.14	0.81

3.2 SAR 影像同震形变分析

图 4（a）和（d）为基于 Sentinel-1 升降轨影像，利用 InSAR 技术获得的玛多地震 LOS 向同震形变场，形变场呈长椭圆形，形似花生状，整体为 SEE-NWW 走向，提取到地表破裂带长约 176km，得到升轨 LOS 向最大抬升量约为 1.29m，最大沉降量约为-1.12m，呈现出震区北升南降的形变特征；降轨 LOS 向最大抬升量约为 1.15m，最大沉降量约为-1.26m，呈现出震区北降南升的形变特征。升降轨形变场特征显示玛多地震为左旋走滑型地震，且相比升轨 LOS 向，降轨 LOS 向与玛多地震同震形变场走向大致平行，表现出更大的同震形变范围，相较于光学遥感影像提取的地表破裂带特征，降轨形变场另外在西段鄂陵湖南侧(34.74° N, 97.75° E) 显示出分支破裂。

图 4（b）和 4（c）、图 4（e）和 4（f）是基于 SAR 像素偏移量跟踪技术获得的玛多地震升轨、降轨距离向和方位向二维同震形变场。可以看到，与 InSAR 技术提取的 LOS 向形变场相比，SAR 像素偏移量跟踪技术提取的距离向形变场在地震破裂带附近地表位移较大区域仍能够获取连续形变值，可以作为 InSAR 结果的有效补充，为获取地震完整地表同震形变场提供参考。然而由于 SAR 像素偏移量跟踪技术的精度主要与空间分辨率和地形高差有关^[44]，导致获取的方位向形变场并不理想，且降轨较之于升轨方位向形变结果，显示出更大的误差，这可能是降轨影像垂直基线较大的缘故^[45]。

在图 4（a）中取 4 条剖面线（aa', bb', cc', dd'）对升降轨 LOS 向和距离向形变结果进行分析（图 5）。可以看出升轨和降轨形变趋势相反，震中区域（bb'）附近形变最小，距离向和 LOS 向具有相同形变趋势，由于两种技术所得结果分辨率和精度的差异，SAR 像素偏移量跟踪距离向结果出现抖动状特征。取 4 条剖面线上距离最近的 LOS 向形变点和距离向形变点作对比（图 5（e-h）），可见升降轨

LOS 向、距离向形变大小基本相同，地表位移量范围基本一致，得到升轨 4 条剖面线上两方向形变对比标准差分别为 0.13m、0.09m、0.31m 和 0.21m，降轨 4 条剖面线上两方向形变对比标准差分别为 0.15m、0.17m、0.44m 和 0.16m；并且升降轨的 LOS 向和距离向结果显示在距离 a 点约 23.70km、距离 b 点约 24.50km、距离 c 点约 25.60km、距离 d 点约 22.00km 处地表产生断裂。

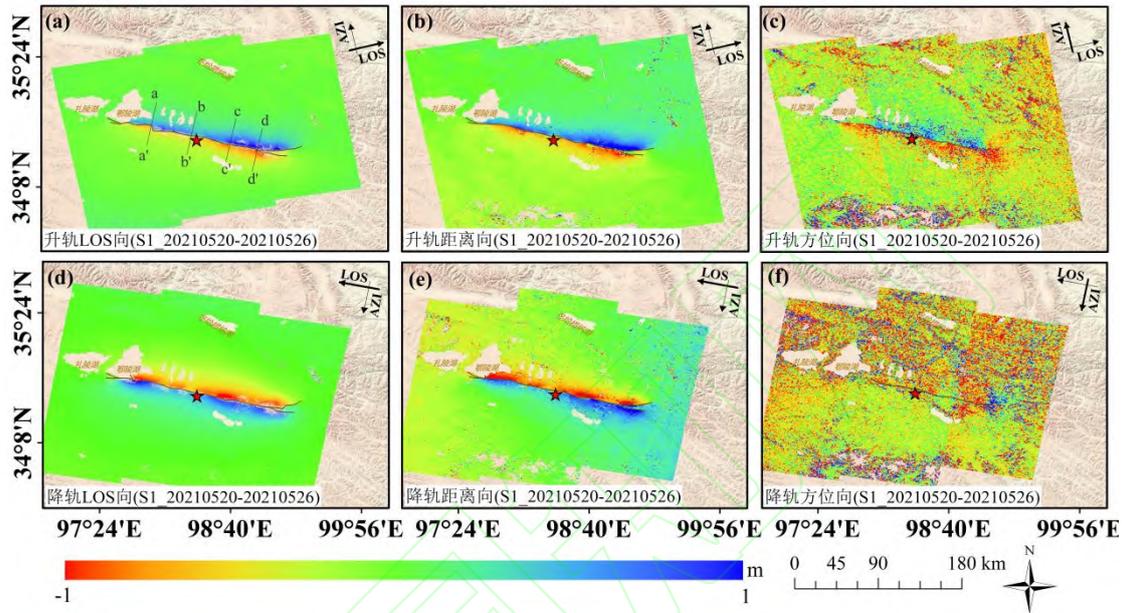


图 4 基于 Sentinel-1 影像的玛多地震同震形变场

Fig.4 Co-seismic Deformation Field of Maduo Earthquake Based on Sentinel-1 Images

(a-c) 分别是基于 Sentinel-1 升轨影像的 LOS 向、距离向和方位向同震形变场；(d-f) 分别是基于 Sentinel-1 降轨影像的 LOS 向、距离向和方位向同震形变场。图中正值表示沿形变方向抬升、负值表示沿形变方向沉降

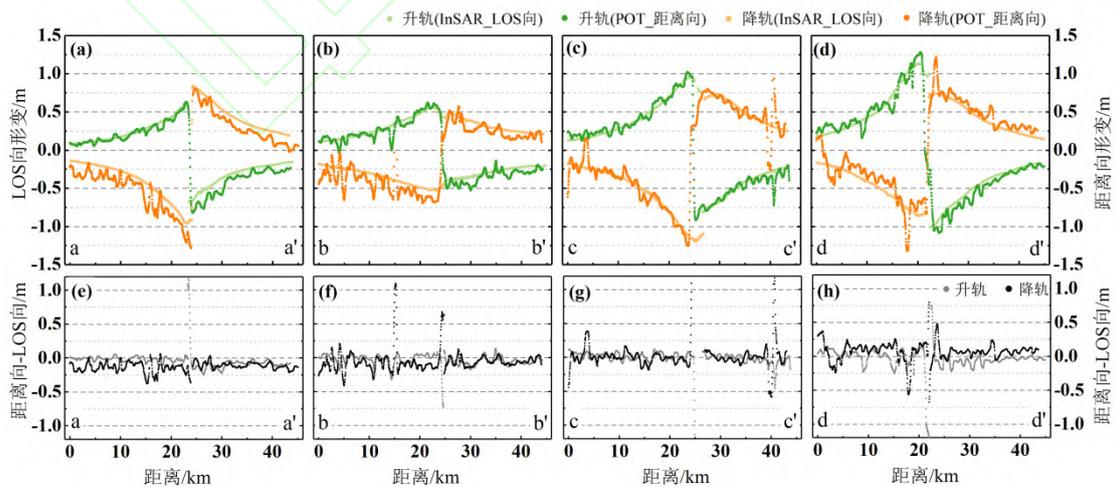


图 5 玛多地震 Sentinel-1 升降轨 LOS 向和距离向同震形变剖面分析

Fig.5 LOS and Range Directions Co-seismic Deformation Profiles of Sentinel-1 for Maduo Earthquake

图 6 (a-c) 和 (d-f) 为联合 InSAR 升降轨 LOS 向形变和 SAR 像素偏移量跟踪升轨方位向形变, 分别采用未加权和加权的最小二乘解算得到的玛多地震地表三维同震形变场, 在此基础上, 图 6 (g-i) 和 (j-l) 为添加 SAR 像素偏移量跟踪升降轨距离向形变参与解算得到的该地震地表三维同震形变场, 其中 Sentinel-1 降轨方位向形变结果由于误差较大, 未参与解算。图 6 显示提取到的地表三维形变结果符合该地震左旋走滑运动特征, 东西向形变场显示该地震最大西向和东向形变分别位于震源中心东南侧约 30km 和 60km 处, 形变量约为 -2.00m 和 1.70m; 在南北向形变场中, 震区形变特征与光学像素偏移量跟踪南北向结果基本一致, 呈现出震北向北, 震南向南运动, 形变值大约集中在 -1.00m~0.50m; 提取的地表垂直向形变主要发生在地震近断裂带区域, 表现为沿断裂带两侧的升降交替运动, 且形变量级较小, 集中在 -0.30m~0.30m 之间。此外可以注意到在东西向和垂直向形变场西段鄂陵湖南侧 (34.74° N, 97.75° E) 存在分支断裂。对比已有的野外现场考察的玛多地震地表破裂^[23], 本文三维形变场结果与震后地表产生裂隙、隆起、裂隙等引起的形变具有一致性特征。

在光学像素偏移量跟踪处理中, 基于 COSI-CORR 软件获取地表形变的互相关匹配算法精度可以达到 1/20 个像素^[46], 理论上基于 Sentinel-2 和 Landsat8 影像的像素偏移量跟踪结果精度分别可以达到 0.50m 和 0.75m。相较于 Landsat8 影像, 使用精度更高且时隔主震最短的 Sentinel-2 影像 (20200624-20210609) 同震形变结果与基于 SAR 影像三维同震形变场中东西向和南北向形变进行验证(图 6(m-p))。基于升降轨 LOS 向形变和升轨方位向形变解算的三维形变场与光学像素偏移量跟踪东西向和南北向形变差值平均值分别为 0.001m 和 0.071m, 标准差分别为 0.674m 和 0.605m; 增加升降轨距离向形变参与解算后, 其东西向和南北向形变差值平均值分别为 0.002m 和 0.078m, 标准差分别为 0.669m 和 0.604m, 可以看出, 增加距离向形变参与解算后, 提高了三维形变场中东西向和南北向形变与光学像素偏移量跟踪形变结果的一致性, 且南北向形变一致性程度高于东西向, 而形变差值的平均值增大的原因很可能是由于距离向形变结果精度相对较低导致的。

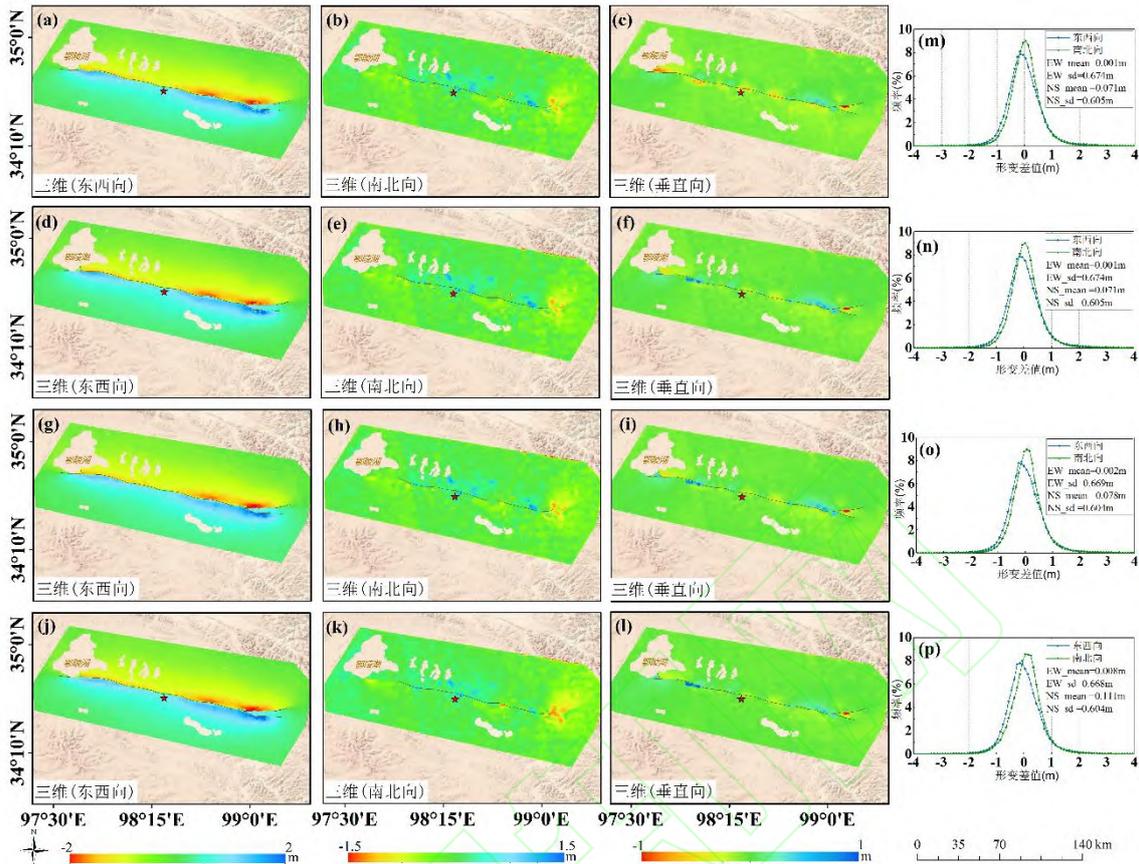


图 6 (a-l)玛多地震三维同震形变场；(m-p)玛多地震东西向和南北向同震形变对比与分析
 Fig.6 (a-l) Three Dimensional Co-seismic Deformation Field of Maduo Earthquake
 (m-p) Comparison and Analysis of East-West and South-North Co-seismic Deformation of Maduo Earthquake

(a-c) 和 (d-f) 分别为基于升降轨 LOS 向形变和升轨方位向形变，采用未加权和加权最小二乘方法提取的东西向、南北向和垂直向三维同震形变场；(g-i) 和 (j-l) 分别为基于升降轨 LOS 向形变和升降轨距离向和方位向形变，采用未加权和加权最小二乘方法提取的东西向、南北向和垂直向三维同震形变场；(m-p) 为 Sentinel-2 (20200624-20210609) 形变结果与三维形变场中东西向、南北向形变差值频率分布。图中正值表示向东、向北和垂直向抬升运动，负值表示向西、向南和垂直向沉降运动

本文基于光学遥感和 SAR 影像，利用像素偏移量跟踪技术和 InSAR 技术得到了玛多地震多个方向同震形变场，提取到该地震地表破裂带如图 7 所示，显示出玛多地震地表破裂主破裂带走向约在 $N101.17^{\circ} E$ 至 $N101.43^{\circ} E$ 。利用像素偏移量跟踪技术，基于 Sentinel-2 影像提取的地表破裂带长约 161km，破裂带东南端和西北端存在分叉，西北端分叉破裂走向约为 $N116.20^{\circ} E$ 和 $N87.28^{\circ} E$ ，东南端分叉破裂走向约为 $N85.44^{\circ} E$ 和 $N107.99^{\circ} E$ ；Landsat8 影像未完全覆盖研究区域，但提取到西北端分叉破裂走向 ($N110.08^{\circ} E$ 和 $N85.37^{\circ} E$) 与 Sentinel-2 基本保持一致。此外基于 Sentinel-1 影像得到的地表破裂带长约 170km，破裂带东南端和西北端分别约为 $N87.33^{\circ} E$ 、 $N108.84^{\circ} E$ 走向分叉和 $N112.10^{\circ} E$ 、 $N94.14^{\circ} E$ 走向分叉；而利用 InSAR 技术提取到地表破裂带长约 176km，破裂带东南和西北端分叉

破裂走向分别约为 $N81.90^{\circ} E$ 和 $N105.09^{\circ} E$ 、 $N109.39^{\circ} E$ 和 $N89.23^{\circ} E$ ，且 SAR 形变场另外在鄂陵湖南侧显示出分支破裂，走向约为 $N148.60^{\circ} E$ （表 4）。最后综合光学遥感和 SAR 影像提取的玛多地震地表破裂带长约 176km，可以看出该地震地表破裂带在东南末端（ $34.48^{\circ} N$ ， $99.04^{\circ} E$ ）和西北末端（ $34.76^{\circ} N$ ， $97.61^{\circ} E$ ）形成分叉，在主破裂带西段（鄂陵湖南侧（ $34.74^{\circ} N$ ， $97.75^{\circ} E$ ））存在分支破裂。本文收集了玛多地震截止 2021 年 10 月 1 日零时的 $M_s 2.0$ 级以上 296 次余震（图 7），余震整体沿地表破裂带呈 SEE-NWW 向狭长条带状分布，定位地表破裂带和余震序列分布，确定该地震发震断裂为江错断裂，余震序列也可以看出在地表破裂带分支附近的展布。

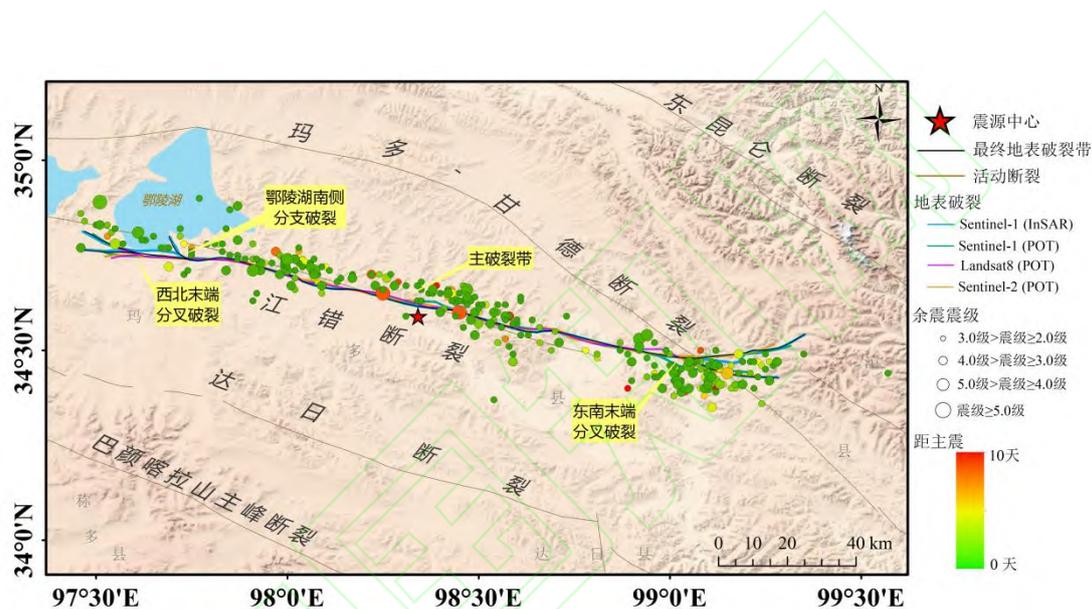


图 7 玛多地震地表破裂及余震分布

Fig.7 Surface Rupture and Aftershock Distribution of Maduo Earthquake

表 4 玛多地震地表破裂信息表

Tab. 4 Surface Rupture Information Table of Maduo Earthquake

地表破裂带		像素偏移量跟踪			InSAR
		Sentinel-2	Landsat8	Sentinel-1	Sentinel-1
主破裂带	整体走向	$N101.27^{\circ} E$	$N101.43^{\circ} E$	$N101.32^{\circ} E$	$N101.17^{\circ} E$
东南末端 ($34.48^{\circ} N$ 、 $99.04^{\circ} E$)	北侧分支走向	$N85.44^{\circ} E$	-	$N87.33^{\circ} E$	$N81.90^{\circ} E$
	南侧分支走向	$N107.99^{\circ} E$	-	$N108.84^{\circ} E$	$N105.09^{\circ} E$
西北末端 ($34.76^{\circ} N$ 、 $97.61^{\circ} E$)	北侧分支走向	$N116.20^{\circ} E$	$N110.08^{\circ} E$	$N112.10^{\circ} E$	$N109.39^{\circ} E$
	南侧分支走向	$N87.28^{\circ} E$	$N85.37^{\circ} E$	$N94.14^{\circ} E$	$N89.23^{\circ} E$
鄂陵湖南侧 ($34.74^{\circ} N$ 、 $97.75^{\circ} E$)	北侧分支走向	-	-	-	$N148.60^{\circ} E$

4 结语

本文以 2021 年 5 月 22 日青海玛多 $M_s7.4$ 地震为研究对象, 基于 Sentinel-2 和 Landsat8 两种光学遥感影像, 利用光学像素偏移量跟踪技术得到玛多地震东西向形变集中在 $-1.60\text{m}\sim 1.60\text{m}$, 南北向形变集中在 $-0.60\text{m}\sim 0.60\text{m}$; 基于 Sentinel-1 升降轨 SAR 影像, 利用 InSAR 技术得到该地震升轨最大 LOS 向抬升和沉降量约为 1.29m 和 -1.12m , 降轨最大 LOS 向抬升和沉降量约为 1.15m 和 -1.26m ; 联合光学遥感和 SAR 影像获取的三维同震形变场中, 东西向形变约为 $-2.00\text{m}\sim 1.70\text{m}$, 南北向形变主要集中在 $-1.00\text{m}\sim 0.50\text{m}$, 垂直向形变约在 $-0.30\text{m}\sim 0.30\text{m}$ 之间。综合分析玛多地震同震形变场, 确定此次玛多地震为左旋走滑型地震, 定位发震断裂为江错断裂; 同震形变以东西向水平运动为主, 地震北侧形变值量级相较于南侧更大, 南北向形变量较小, 垂直方向上呈现出沿断裂带两侧升降交替运动, 与该地震沿断裂带形成一系列挤压鼓包和裂隙等所具有的形变特征相一致; 提取到的地表破裂带长约 176km , 在东南末端 ($34.48^\circ\text{N}, 99.04^\circ\text{E}$) 和西北末端 ($34.76^\circ\text{N}, 97.61^\circ\text{E}$), 以及西段鄂陵湖南侧 ($34.74^\circ\text{N}, 97.75^\circ\text{E}$) 存在分支破裂。本研究表明, InSAR 技术和像素偏移量跟踪技术优势互补, 为获取地震完整同震形变场提供了有效途径, 并且多平台、高空间分辨率的光学遥感和 SAR 影像, 为详细刻画地震地表破裂特征提供了重要数据保障。此次玛多地震显著的同震形变场揭示了青藏高原巴颜喀拉块体断层活动依然活跃, 该地区作为我国地震主体活动区域应持续受到关注。

致谢: 感谢欧空局提供的 Sentinel-2、Sentinel-1 影像和 DORIS 精密轨道文件, 以及 USGS 提供的 Landsat8 影像和 SRTM 30m DEM 数据; 感谢英国纽卡斯大学和长安大学提供的对流层延迟校正产品 (GACOS) 数据; 感谢中国地震台网中心提供的青藏高原历史地震目录、玛多地震余震序列和震源中心数据。感谢贵刊编辑部和匿名审稿专家为本文提出的宝贵意见与建议!

参考文献

- [1] Zhang J, Zhu W, Cheng Y, et al. Landslide Detection in the Linzhi–Ya’an Section along the Sichuan–Tibet Railway Based on InSAR and Hot Spot Analysis Methods[J]. Remote Sensing, 2021, 13(18): 3566
- [2] Massonnet D, Feigl K L. Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth’s Surface[J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441-500
- [3] Michel R, Avouac J-P, Taboury J. Measuring Ground Displacements from SAR Amplitude Images: Application to the Landers Earthquake[J]. Geophysical Research Letters, 1999, 26(7): 875-878
- [4] Elliott J L, Freymueller J T, Rabus B. Coseismic Deformation of the 2002 Denali Fault

- Earthquake: Contributions from Synthetic Aperture Radar Range Offsets[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B6): B06421
- [5] Fialko Y, Sandwell D, Simons M, et al. Three-Dimensional Deformation Caused by the Bam, Iran, Earthquake and the Origin of Shallow Slip Deficit[J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 295-299
- [6] Michel R, Avouac J-P. Deformation due to the 17 August 1999 Izmit, Turkey, Earthquake Measured from SPOT Images: IZMIT EARTHQUAKE MEASURED FROM SPOT IMAGES[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2002, 107(B4): ETG 2-1-ETG 2-6
- [7] Ajorlou N, Hollingsworth J, Mousavi Z, et al. Characterizing Near-Field Surface Deformation in the 1990 Rudbar Earthquake (Iran) Using Optical Image Correlation[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(6)
- [8] Wang Leyang, Zou Ajian. Retrieving 3-D Coseismic Deformation of the 2016 Mw7.8 Kaikoura Earthquake Using SAR and Optical Data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022:1-14(王乐洋, 邹阿健. 结合 SAR 和光学数据检索凯库拉 Mw7.8 地震三维形变[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022:1-14)
- [9] Zhang C, Li Z, Yu C, et al. An Integrated Framework for Wide-Area Active Landslide Detection with InSAR Observations and SAR Pixel Offsets[J]. *Landslides*, 2022
- [10] Yao J, Yao X, Wu Z, et al. Research on Surface Deformation of Ordos Coal Mining Area by Integrating Multitemporal D-InSAR and Offset Tracking Technology[J]. *Journal of Sensors*, 2021, 2021(4): 1-14
- [11] Yu Pengfei, Xiong Wei, Chen Wei, et al. Slip Model of the 2021 M7.4 Madoi Earthquake Constrained by GNSS and InSAR Coseismic Deformation[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, 65(2):509-522,(余鹏飞, 熊维, 陈威, 等. 基于 GNSS 和 InSAR 约束的 2021 年玛多 Ms7.4 地震同震滑动分布及应用[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(2): 509-522)
- [12] Liu Jihong, Hu Jun, Li hiwei, et al. Complete Three-Dimensional Coseismic Displacements due to the 2021 Maduo Earthquake in Qinghai Province, China from Sentinel-1 and ALOS-2 SAR Images[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(5): 882-892(刘计洪, 胡俊, 李志伟, 等. 融合哨兵 1 号和 ALOS-2 数据的 2021 年青海玛多地震高精度三维同震形变场研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(5): 882-892)
- [13] Li Haibing, Pan liawei, Sun Zhiming, et al. Continental Tectonic Deformation and Seismic Activity: A Case Study from the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(1): 194-213(李海兵, 潘家伟, 孙知明, 等. 大陆构造变形与地震活动——以青藏高原为例[J]. *地质学报*, 2021, 95(1): 194-213)
- [14] Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, et al. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025-2042(邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势[J]. *地球物理学报*, 2014, 57(7): 2025-2042)
- [15] Jia Shixu, Lin Jiyan, Guo Wenbin, et al. Investigation on Diversity of Crustal Structures Beneath the Bayan Har Block[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(6): 2226-2238(嘉世旭, 林吉焱, 郭文斌, 等. 巴颜喀拉块体地壳结构多样性探测[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(6): 2226-2238)
- [16] Gao Xiang, Deng Qidong. Activity Analysis of Large Earthquakes in Boundary Faults around the Bayankala Faulting Block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(1): 9-19(高翔, 邓起东. 巴颜喀喇断块边界断裂强震活动分析[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 9-19)
- [17] Robinson D P, Brough C, Das S. The Mw7.8, 2001 Kunlunshan Earthquake: Extreme Rupture

- Speed Variability and Effect of Fault Geometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B8):B08303
- [18] Li Z, Elliott J R, Feng W, et al. The 2010 MW 6.8 Yushu (Qinghai, China) Earthquake: Constraints Provided by InSAR and Body Wave Seismology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(B10): B10302
- [19] Feng G, Hetland E A, Ding X, et al. Coseismic Fault Slip of the 2008 Mw7.9 Wenchuan Earthquake Estimated from InSAR and GPS Measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(1)
- [20] Huang Y, Qiao X, Freymueller J T, et al. Fault Geometry and Slip Distribution of the 2013 Mw6.6 Lushan Earthquake in China Constrained by GPS, InSAR, Leveling, and Strong Motion Data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2019, 124(7): 7341-7353
- [21] Zhao D, Qu C, Shan X, et al. InSAR and GPS Derived Coseismic Deformation and Fault Model of the 2017 Ms7.0 Jiuzhaigou Earthquake in the Northeast Bayanhar Block[J]. *Tectonophysics*, 2018, 726: 86-99
- [22] Li Zhicai, Ding Kaihua, Zhang Peng, et al. Co-seismic Deformation and Slip Distribution Of 2021 Mw7.4 Madoi Earthquake from GNSS Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1489-1497(李志才, 丁开华, 张鹏, 等. GNSS 观测的 2021 年青海玛多地震 (Mw 7.4) 同震形变及其滑动分布[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1489-1497)
- [23] Pan Jiawei, Bai Mingkun, Li Chao, et al. Coseismic Surface Rupture and Seismogenic Structure of the 2021-05-22 Maduo (Qinghai) Ms7.4 Earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(6): 1655-1670(潘家伟, 白明坤, 李超, 等. 2021 年 5 月 22 日青海玛多 Ms7.4 地震地表破裂带及发震构造[J]. *地质学报*, 2021, 95(6): 1655-1670)
- [24] Wang Weilai, Fang Lihua, Wu Jianping, et al. Aftershock Sequence Relocation of the 2021 Ms7.4 Maduo Earthquake, Qinghai, China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2021, 51(7): 1193-1202(王未来, 房立华, 吴建平, 等. 2021 年青海玛多 Ms7.4 地震序列精定位研究[J]. *中国科学:地球科学*, 2021, 51(7): 1193-1202)
- [25] He Lijia, Feng Guangcai, Feng Zhixiong, et al. Coseismic Displacements of 2016 Mw7.8 Kaikoura, New Zealand Earthquake, Using Sentinel-2 Optical Images[J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 339-351(贺礼家, 冯光财, 冯志雄, 等. 哨兵-2 号光学影像地表形变监测:以 2016 年 Mw7.8 新西兰凯库拉地震为例[J]. *测绘学报*, 2019, 48(3): 339-351)
- [26] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and Precise Orthorectification, Coregistration, and Subpixel Correlation of Satellite Images, Application to Ground Deformation Measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(6): 1529-1558
- [27] Yang W, Wang Y, Wang Y, et al. Retrospective Deformation of the Baige Landslide Using Optical Remote Sensing Images[J]. *Landslides*, 2020, 17(3): 659-668
- [28] Liu Lin, Song Haofeng, Du Yanan, et al. Time-Series Offset Tracking of the Baige Landslide Based on Sentinel-2 and Landsat 8[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1461-1470(柳林, 宋豪峰, 杜亚男, 等. 联合哨兵 2 号和 Landsat 8 估计白格滑坡时序偏移量[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2021, 46(10): 1461-1470)
- [29] Feng G, Ding X, Li Z, et al. Calibration of an InSAR-Derived Coseismic Deformation Map Associated With the 2011 Mw-9.0 Tohoku-Oki Earthquake[J]. *IEEE Geoscience and Remote*

- Sensing Letters, 2012, 9(2): 302-306
- [30] Michel R, Avouac J-P. Coseismic Surface Deformation from Air Photos: The Kickapoo Step over in the 1992 Landers Rupture: AIRBORNE IMAGERY OF COSEISMIC RUPTURE[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2006, 111(B3): n/a-n/a
- [31] Scherler D, Leprince S, Strecker M R. Glacier-Surface Velocities in Alpine Terrain from Optical Satellite Imagery—Accuracy Improvement and Quality Assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(10):3806-3819
- [32] Ding C, Feng G, Li Z, et al. Spatio-Temporal Error Sources Analysis and Accuracy Improvement in Landsat 8 Image Ground Displacement Measurements[J]. Remote Sensing, 2016, 8(11):937
- [33] Wegmüller U, Werner C. Gamma SAR Processor and Interferometry Software[J]. ESA SP (Print), 1997: 1687-1692
- [34] Scheiber R, Moreira A. Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2179-2191
- [35] Goldstein R M, Werner C L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications[J]. Geophysical Research Letters, 1998, 25(21): 4035-4038
- [36] Pepe A, Lanari R. On the Extension of the Minimum Cost Flow Algorithm for Phase Unwrapping of Multitemporal Differential SAR Interferograms[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2374-2383
- [37] Yu C, Penna N T, Li Z. Generation of Real-Time Mode High-Resolution Water Vapor Fields from GPS Observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(3): 2008-2025
- [38] Yu C, Li Z, Penna N T. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction Using a GPS-Based Iterative Tropospheric Decomposition Model[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204: 109-121
- [39] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2384-2391
- [40] Wegmüller U, Werner C, Strozzi T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software[J]. Procedia Computer Science, 2016, 100: 1305-1312
- [41] Zhang Chenglong, Li Zhenhong, Zhang Shuangcheng, et al. Surface Ruptures of the 2022 Mw6.7 Menyuan Earthquake Revealed by Integrated Remote Sensing[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(8): 1257-1270(张成龙, 李振洪, 张双成, 等. 综合遥感解译 2022 年 Mw6.7 青海门源地震地表破裂带[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(8): 1257-1270)
- [42] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T, et al. Precision Estimation of Local Offsets between Pairs of SAR SLCs and Detected SAR Images[C]//Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05.. Seoul, Korea:IEEE,2005: 4803-4805
- [43] Huang L, Li Z. Comparison of SAR and Optical Data in Deriving Glacier Velocity with Feature Tracking[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32(10): 2681-2698
- [44] Yan S, Guo H, Liu G, et al. Mountain Glacier Displacement Estimation Using a DEM-Assisted Offset Tracking Method with ALOS/PALSAR Data[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(5): 494-503

- [45] Zhang W, Zhu W, Tian X, et al. Improved DEM Reconstruction Method Based on Multibaseline InSAR[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5
- [46] Konca A O, Leprince S, Avouac J-P, et al. Rupture Process of the 1999 Mw 7.1 Duzce Earthquake from Joint Analysis of SPOT, GPS, InSAR, Strong-Motion, and Teleseismic Data: A Supershear Rupture with Variable Rupture Velocity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2010, 100(1): 267-288

网络首发:

标题: 联合光学遥感和SAR影像青海玛多Ms7.4级地震同震形变场分析

作者: 张双成, 赵颖, 张成龙, 张菊清, 樊茜佑, 司锦钊, 张雅斐, 朱武, 李振洪

DOI: 10.13203/j.whugis20220615

收稿日期: 2023-06-04

引用格式:

张双成, 赵颖, 张成龙, 等. 联合光学遥感和SAR影像青海玛多Ms7.4级地震同震形变场分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220615 (ZHANG Shuangcheng, ZHAO Ying, ZHANG Chenglong, et al. Co-seismic Deformation Analysis of Qinghai Maduo Ms7.4 Earthquake Based on Optical Remote Sensing and SAR Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j. whugis20220615)