

文章编号: 1006-6616 (2010) 02-0129-08

玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析

姚 鑫, 张永双, 杨 农, 熊探宇

(国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室; 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 采用玉树 $M_s 7.1$ 级地震前后两期 PALSAR 雷达数据 (震前 2010 年 1 月 15 日, 震后 4 月 17 日) 进行了“两轨 + DEM”的 InSAR 处理, 获得了高质量的差分干涉雷达条纹图像和同震变形场。参考该区的基本构造格局, 根据干涉图像的变形范围、变形量和变形梯度可以初步判断: (1) 玉树地震诱发了总体上 NWW 走向, 全长约 70km 地表陡变带, 陡变带南段位错及陡变梯度较大, 会在地表产生地表破裂; 而西北部 4 段位错及陡变梯度较小, 不易在地表诱发破裂, 但可能在地下一定层位产生了隐伏破裂带; (2) 陡变带两侧的雷达视线向运动方向预示发震断裂以左旋走滑运动为主; (3) 宏观震中位于玉树县城西北约 16km 的地表陡变带上。D-InSAR 解译结果与中国地震台网中心震源机制解、野外发震断裂调查结果及地貌特征吻合较好, 证明了干涉雷达解译成果的可靠性, 可以为准确定位玉树地震发震断裂地表行迹和快速评定震害损失提供有力的技术支持。

关键词: 玉树地震; 干涉合成孔径雷达; 地表破裂; 同震形变场

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

0 前言

继昆仑山口地震 (2001 年 8.1 级)、汶川地震 (2008 年 8 级)^[1-8]之后, 于 2010 年 4 月 14 日 07 时 49 分 40.7 秒, 青海省玉树藏族自治州玉树县发生 $M_s 7.1$ 级地震^[9-11]。中国地震台网中心 (CENC) 测得这次地震的震中位置为 33.2°N , 96.6°E , 震源深度 14km。美国地质调查局 (USGS) 公布的震中位置 ($\pm 6.6\text{km}$) 为 33.271°N , 96.629°E , 震源深度为 10km, 震级 $M_w 6.9$ 。截至 4 月 21 日 17 时, 地震造成 2220 人遇难, 失踪 84 人。地震造成连续的地表破裂, 大量民房倒塌, 其中重灾区玉树县州府结古镇房屋倒塌最为严重。

对于玉树地震, 地震波形数据计算的震中位置与地震地质调查的宏观震中存在较大差别。野外可观察到的地表破裂长度只有 20 ~ 30km, 余震的分布与地震波形数据及野外调查结果的相关性也比较低, 这些观察调查结果都很难全面的约束发震断层的几何特征, 而这是

收稿日期: 2010-05-16

基金项目: 自然科学基金项目 (编号: 40902059), 地质力学研究所基本科研业务费项目 (编号: DZLXJK200906), 中国地质调查局工作项目 (编号: 1212010914025)。

作者简介: 姚鑫 (1978-), 男, 博士, 地质工程专业。E-mail: yaoxinphd@163.com

通讯地址: 北京市海淀区民族大学南路 11 号, 中国地质科学院地质力学研究所, 100081

深入理解发震构造的重要信息。InSAR 形变场的全面覆盖有望提供详细的断层几何参数和滑动参数,多种数据源的联合反演可能会提供更加准确的地震构造信息。

震后第3天(2010年4月17日)日本ALOS卫星系统拍摄了震中附近约4000km²范围内的雷达数据,这样的覆盖对于深入了解玉树M_s7.1级地震是十分必要和及时的。本文利用干涉雷达技术(InSAR)对ALOS雷达数据进行了处理,获得了玉树地震的同震形变场,为深刻理解此次地震的形变过程和发生机理,以及未来地震灾害的演化趋势提供了重要的实测资料。

1 地质概况与发震断裂

1.1 地质概况

玉树县地处玉树藏族自治州东部,境内地形以高海拔、低起伏山地为主,平均高程4548m。研究区内主要水系包括通天河、扎曲、巴曲等。玉树县下辖结古、隆宝、下拉秀、巴塘、安冲、仲达、上拉秀、小苏莽五乡三镇。基本形成以结古镇为中心,国道214线、玉树—治多、玉树—杂多公路为依托的公路网络体系。在大地构造上,玉树县处于巴颜喀拉(松潘—甘孜)地块,与羌塘地块毗邻(图1)。巴颜喀拉地块与羌塘地块的接触带从玉树地区通过,玉树7.1级地震则是发生在巴颜喀拉块体南边界中部的甘孜—玉树断裂带上,该断裂带为青藏高原内部的一条北西向的大型走滑活动断裂带,同时也是川滇菱形块体的一条重要边界断裂,它的生成、演化及新活动特征和青藏高原的动力学过程密切相关^[12-13](图1)。

1.2 玉树地震发震断裂

青海玉树地震是甘孜—玉树活动断裂带突发错动的结果。甘孜—玉树断裂带规模巨大,西起青海治多县那王草曲塘,经当江、玉树、邓柯、玉隆至四川甘孜县城南,全长约500km。甘孜—玉树断裂是在前第四纪基岩断裂带的基础上发展起来的一条全新世强烈活动断裂。老的基岩断裂破碎带一般宽数十米至百余米,局部地段达数百米。而新的破裂面则局限于比较狭窄的范围内,一般仅有一条新活动面^[14]。甘孜—玉树断裂带晚第四纪以来的强烈左旋走滑运动在地貌上留下了非常醒目的痕迹,沿断裂线、冲沟、洪积扇、河流阶地、冰碛垄及山脊等往往被断裂左旋错断(图1)。沿甘孜—玉树活动断裂带,在玉树—红土山垭口一线,多处可见多次古地震形成的反向陡坎,高达0.5~1.5m,沟谷的左旋位移达35m。

甘孜—玉树断裂带具有长期活动的地质演化历史,晚新生代以来,该断裂带构成巴颜喀拉地块的边界带,构造活动非常强烈,控制了一系列强烈地震的发生^①。北西段和中段走滑速率8mm/a左右,南东段约10mm/a左右^②。另据在断裂南东段甘孜一带的研究表明,该断裂千年尺度的滑动速率达每年10mm左右,GPS观测的现代滑动速率也在每年10mm左右^①。断裂带在玉树县附近的走向为N70°W,该段曾经在1738年12月23日青海玉树及其西北发生过6.5级地震,1896年3月在其附近的四川省石渠洛须—青海玉树间发生7.0级地震,1979年3月29日青海玉树南东6.2级地震^②,2006年7月18、19日在青海玉树发生了5.0、5.6、5.4级地震^[15],2010年4月14日玉树7.1级地震是近年来甘孜—玉树断裂带在玉树

① 中国地震局地质研究所,2010.“青海玉树7.1级地震震区地震构造分析。”<http://www.eq-igl.ac.cn/>

② 冉永康,2010.“甘孜—玉树断裂及历史大地震活动情况简介。”from internet.

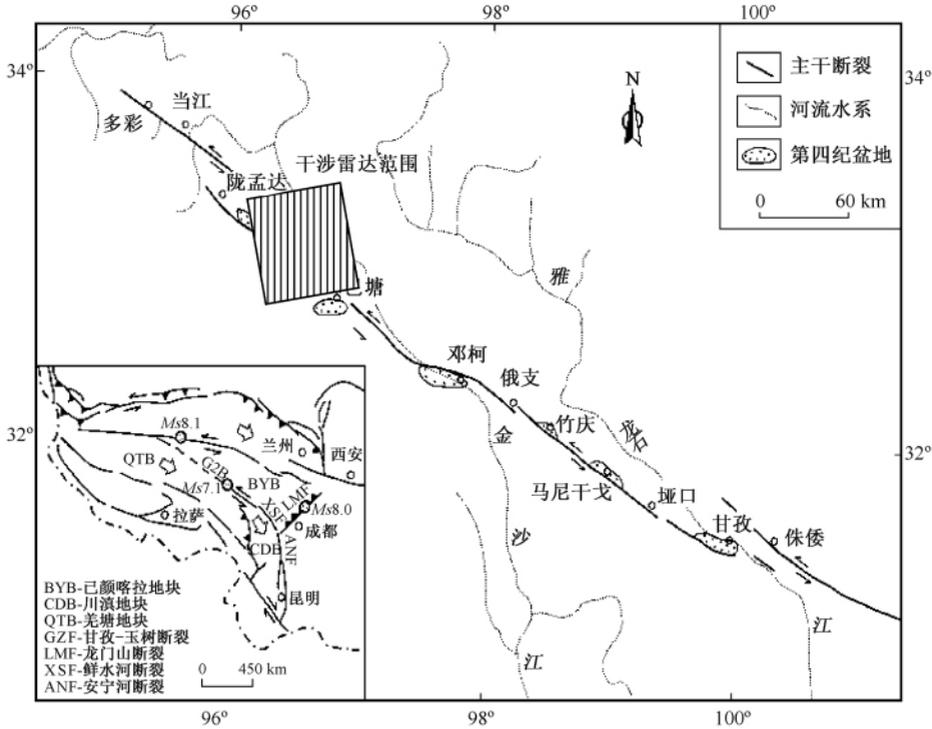


图 1 甘孜 - 玉树断裂带地表活动形迹图 (据周荣军等^[14], 1997 年修改) 及干涉雷达覆盖范围

Fig. 1 A map showing the distribution map of Gz nai-Yushu active fault zone (after Zhou Rongjun, 1997) and InSAR covering area

县附近发生的最大一次地震。

2 数据选取与初步处理

震后日本航空航天局 (JAXA) 启动了灾害应急观测, 于 2010 年 4 月 17 日晚获取了震后的第一幅 PALSAR 雷达数据 (覆盖范围见图 1), 与震前 2010 年 1 月 15 日观测的数据配成跨越地震且时间基线最短的一对干涉数据。欧空局 (ESA) 的 EnviSAT 雷达卫星也制定了玉树地震的干涉雷达观测, 但由于轨道和回归周期的限制 2010 年 4 月 27 日才能够构成覆盖研究区的干涉像对。本文利用的干涉雷达数据对为 ALOS 卫星 487 轨道上的 650 与 640 两景 PALSAR 数据, 拍摄时间分别为 2010 年 1 月 15 日和 2010 年 4 月 17 日, 波长 23.6cm, 入射角 34.3°, 重复轨道间垂直基线距 +684m。玉树地区, 高海拔、低起伏、稀疏植被覆盖的自然条件为获取高高度相关的干涉雷达像数据对提供了良好的条件, 有利于后续 D-InSAR 的处理和分析。

InSAR 形变观测结果不能像 GPS 观测一样直接利用, 这与 InSAR 的成像特点有关。InSAR 观测到的相位变化是地面各个方向形变在雷达视线向 (LOS, Look of sight) 的投影, 不同方向的形变贡献大小不同, 称为干涉雷达的 LOS 向模糊问题。根据日本航空航天局 ALOS 卫星的全球观测策略, 用于覆盖汶川地震的 PALSAR 雷达图像采用升轨观测, 垂向入

射角 θ 为 34.3° ，视线向为 NE 81.84° ，计算可得相应的雷达视线向变形量与垂直、北、东变形量关系为：

$$d_{\text{LOS}} = [d_{\text{up}} \ d_{\text{n}} \ d_{\text{e}}] [0.83, -0.08, -0.56]^T \quad (1)$$

式中： d_{LOS} —视线向变形； d_{up} —垂直变形分量； d_{n} —北方向变形分量； d_{e} —东方向变形分量。

公式 (1) 表明干涉雷达的视线向变形主要反映地表垂直形变和近东西向变形，这对于观测甘孜—玉树走滑型断裂运动比较有利。

本文研究中利用两路差分干涉方法，使用 SRTM DEM 数据消除地形相位，用剪枝法进行解缠，其优点是充分利用已知地形信息，通过最少的雷达观测，在震后快速获得同震形变场。

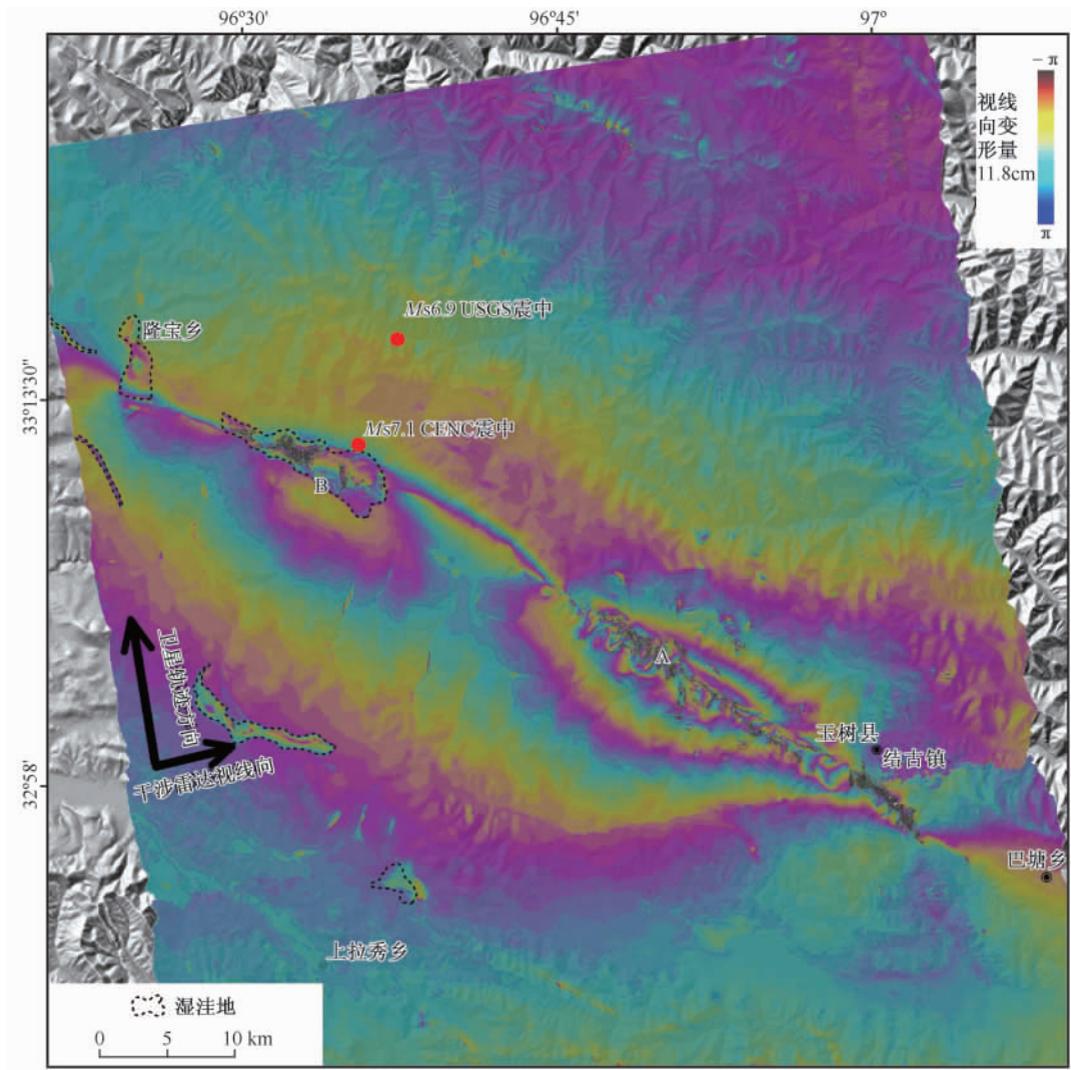


图 2 玉树地震同震形变 InSAR 缠绕条纹图

Fig. 2 Wrapped InSAR strip image of Yushu earthquake co-seismic deformation

3 玉树地震同震变形场的变形特征

初步干涉获取的同震变形 D-InSAR 图像（图 2）是缠绕在一个相位周期（ $-\pi \sim \pi$ 弧度）内的 D-InSAR 观测结果，相当于卫星视线向（LOS）变形的等值线，每个条纹代表 11.8cm 的 LOS 变形。干涉条纹图像显示玉树地震产生的变形范围为一个 NW—SE 走向的椭圆形区域，椭圆长轴约 70km，短轴约 40km，长轴 SE 端位于玉树县附近，NW 端截止于隆宝乡附近，涉及范围约 2500km²，干涉图像中可见两处明显变形区，变形区中心分别位于玉树县城 NW 侧 16km 处（图 2A 区）及 CENC 微观震中以南 5km 附近（图 2B 区）。

将干涉雷达条纹图像解算为同震地表变形的绝对量值（图 3），清晰地展现出一条 NW 走向狭长的地表陡变带，全长 72km。总体上，陡变带 SW 盘变形为正，代表顺卫星视线向变形分量较大（近向东运动）；NE 盘变形为负，代表逆卫星视线向变形分量较大（近西向运动）。卫星最大视线向拉伸量高值区为 35cm，缩短量高值区为 25cm 左右，视线向拉伸量极值为 50cm，视线向缩短量极值为 38cm，都位于玉树县城 NW 方位 16km 附近的区域，如果这两个 LOS 最大位移都是由水平运动产生，则根据 LOS 变形与地面变形的关系，破裂带附近水平位错在 1.5m 以上。

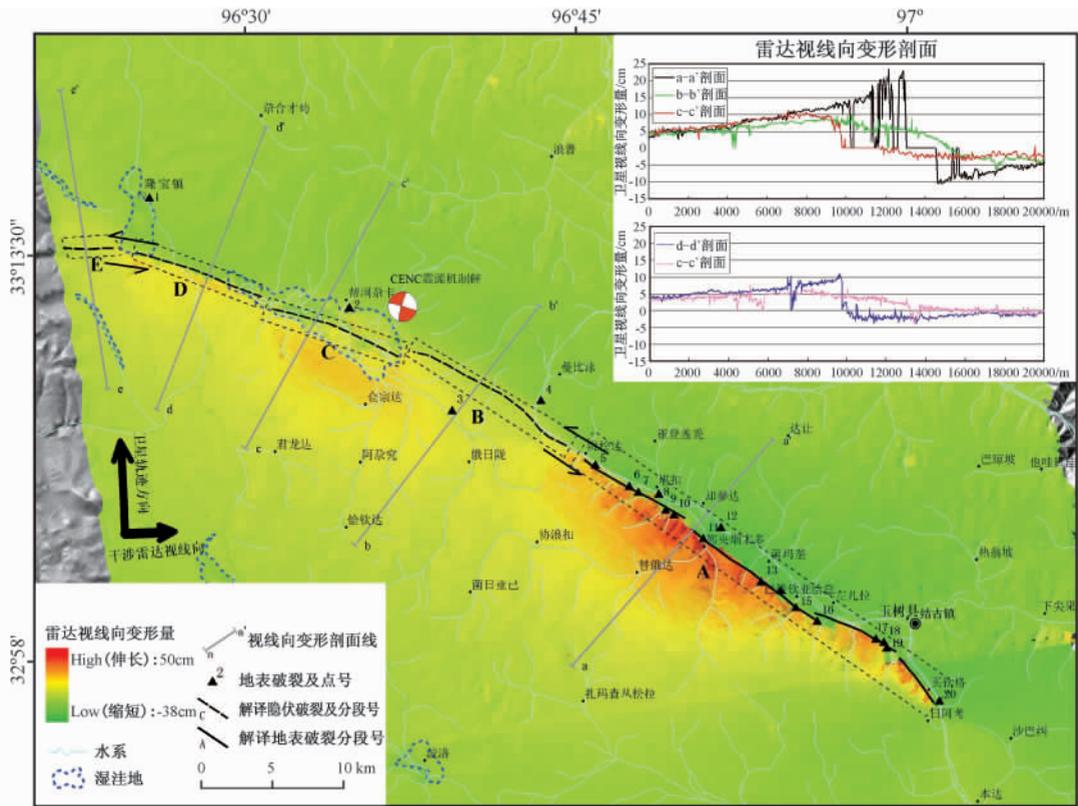


图 3 玉树地震干涉雷达视线向变形图

Fig. 3 InSAR LOS Deformation of Yushu earthquake

陡变带基本可分为 5 段（A ~ E，图 3 中黑色虚线框分段），对应的 a-a' ~ e-e' 五条剖面

中可见 A 段 LOS 位错量最大，其位置与现场地震地质调查确定的宏观震中一致；CENC 微观震中附近 B、C、D 段 LOS 位错可达 15cm，最北段的 E 段 LOS 位错为 10cm 左右，5 条剖面的总体位错量由 SE 向 NW (A ~ E) 逐渐减少。c-c'、e-e' 剖面在湿洼地部位亦有明显的形变特征，现场调查表明沼泽相淤泥质土在地震作用下发生流变滑移，另一方面季节水位变化会导致膨胀土和冻土的体积变形，这些地表变形在干涉雷达图像上产生了相应的反映。D-InSAR 解译结果与 CENC 震源机制解、野外发震断裂调查结果 (图 3 中地表破裂点)^③ 及地貌特征 (图 4) 吻合较好，证明了干涉雷达解译成果的可靠性。

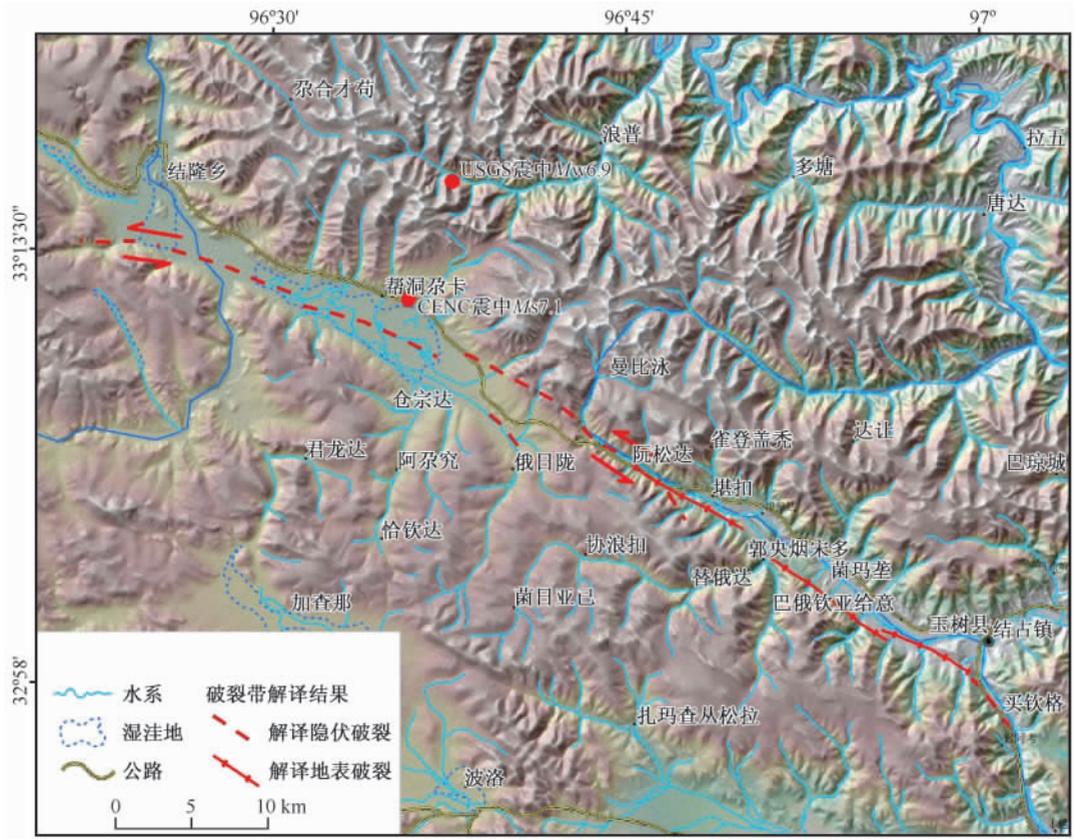


图 4 干涉雷达解译地表破裂带 (背景为 90m SRTM 制作的玉树地区地形阴影图)

Fig. 4 Surface ruptures based on InSAR (Background is the 90m SRTM hillshade map)

4 初步认识

参考该区的基本构造格局，借鉴以往地震的干涉雷达解译成果特征，根据 InSAR 获取的变形范围、变形量和变形梯度可初步推断：(1) 玉树地震诱发了总体上 NWW 走向，全长约 70km 地表陡变带，陡变带南段 (图 3 中实线段) 位错及陡变梯度较大，会在地表产生地表破裂；而西北部 4 段位错及陡变梯度较小 (图 3 中虚线段)，不易在地表诱发破裂，但可能在地下一定层位产生了隐伏破裂带。(2) 陡变带两侧的地表运动方向预示发震断裂以

^③ 中国地震局, 2010. 玉树 7.1 级地震断层地表破裂带和地质灾害调查报告 <http://www.cea.gov.cn>

左旋走滑为主。(3) 宏观震中位于玉树县城西北约 16km 的地表陡变带上。

通过 InSAR 形变观测, 本文获得了玉树地震同震地壳形变图像, 对于了解该地震的震机理、准确定位玉树地震发震断裂地表行迹和快速评定震害损失等工作具有一定的参考作用。虽然距离得出断层破裂模型还有较长的路要走, 但是从原始的干涉形变图像上我们已经可以得出一些重要的地质和地球物理信息, 这些信息对于深入研究玉树地震以及震后重建都具有重要意义。下一步需要研究 InSAR 同震形变的反演, InSAR 形变与 GPS 形变联合反演, 以及同震和震后应力应变场演化等更为重要的科学问题。

D-InSAR 监测地形变具有范围大、速度快、空间分布连续、不受天气条件限制、可以对历史地质过程进行追溯研究等优势, 适合于我国西部地区形变观测不便、台网稀少, 但新构造活动发育、活动断裂密集、地震多发的基本情况, 对西部复杂构造运动问题的深入研究具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] 张永双, 石菊松, 孙萍, 等. 汶川地震内外动力耦合及灾害实例 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
ZHANG Yong-shuang, SHI Ju-song, SUN Ping, et al. Coupling between endogenic and exogenic geological processes in the Wenchuan earthquake and example analysis of geo-hazards [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 131 ~ 141.
- [2] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川 5.12 地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
ZHANG Yong-shuang, LEI Wei-zhi, SHI Ju-song, et al. General characteristics of 5.12 earthquake-induced geo-hazards in Sichuan [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 109 ~ 116.
- [3] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. 5.12 汶川 M_s 8.0 大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
TAN Cheng-xuan, SUN Ye, WU Shu-ren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after M_s 8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 142 ~ 150.
- [4] 王连捷, 周春景, 孙东生, 等. 汶川 5.12 地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
WANG Lian-jie, ZHOU Chun-jing, SUN Dong-sheng, et al. Coulomb stress changes caused by Wenchuan earthquake and its influence on seismic activity in the adjacent area [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (3): 193 ~ 200.
- [5] 王连捷, 崔军文, 周春景, 等. 汶川 5.12 地震发震机理的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, ZHOU Chun-jing, et al. Numerical modeling for Wenchuan earthquake mechanism [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 105 ~ 113.
- [6] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 114 ~ 130.
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 114 ~ 130.
- [7] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 山丹地应力监测站体应变仪的地震效应 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 97 ~ 108.
PENG Hua, MA Xiu-min, JIANG Jing-jie. Analysis of the volume strain data from the Shandan in-situ stress Monitoring Station [J]. Journal of Geomechanics, 2008, 14 (2): 97 ~ 108.
- [8] 姚鑫, 张永双. 基于差分干涉雷达成像的汶川地震同震形变特点 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
YAO Xin, ZHANG Yong-shuang. Co-seismic deformation of 5.12 Wenchuan earthquake based on D-INSAR [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (2): 151 ~ 161.
- [9] 马寅生, 张永双, 胡道功, 等. 玉树地震地表破裂与宏观震中 [J]. 地质力学学报, 2010, 16 (2): 115 ~ 124.
MA Yin-sheng, ZHANG Yong-shuang, HU Dao-gong, et al. The surface ruptures and the macroscopical epicenter of Yushu M_s 7.1 Earthquake [J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16 (2): 115 ~ 124.
- [10] 姚鑫, 张永双, 杨农, 等. 玉树地震地表变形 InSAR 观测及初步分析 [J]. 地质力学学报, 2010, 16 (2): 129

~ 136.

YAO Xin, ZHANG Yong-shuang, YANG Nong, et al. D-InSAR Deformation Observation and Preliminary Analysis of the $M_s7.1$ Yushu Earthquake [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 129 ~ 136.

- [11] 王连捷, 崔军文, 王薇, 等. 青海玉树 $M_s7.1$ 地震发震过程的数值模拟 [J]. *地质力学学报*, 2010, 16 (2): 137 ~ 145.
- WANG Lian-jie, CUI Jun-wen, WANG Wei, et al. Numerical modeling of Yushu $M_s7.1$ earthquake mechanism [J]. *Journal of Geomechanics*, 2010, 16 (2): 137 ~ 145.
- [12] 张岳桥, 杨农, 施炜, 等. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (12): 1668 ~ 1678.
- ZHANG Yue-qiao, YANG Nong, SHI Wei, et al. Neotectonics of Eastern Tibet and Its Control on the Wenchuan Earthquake [J]. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 2008, 82 (12): 1668 ~ 1678.
- [13] 嵇少丞, 王茜, 孙圣思, 等. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (12): 1644 ~ 1667.
- Ji Shao-cheng, WANG Qian, SUN Sheng-si, et al. Continental Extrusion and Seismicity in China [J]. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 2008, 82 (12): 1644 ~ 1667.
- [14] 周荣军, 闻学泽, 蔡长星, 等. 甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计 [J]. *地震地质*, 1997, 19 (2): 115 ~ 124.
- ZHOU Rong-jun, WEN Xue-ze, CHAI Chang-xing, et al. Recent Earthquakes and Assessment of Seismic Tendency on The Ganzi Yushu Fault Zone Seismology and Geology [J]. *SEISMOLOGY AND GEOLOGY*, 1997, 19 (2): 115 ~ 124.
- [15] 都昌庭, 李文巧, 卢宁, 等. 2006年青海玉树5.0、5.6、5.4级地震灾害损失及震害特点 [J]. *震灾防御技术*, 2006, 1 (4): 371 ~ 377.
- DU Chang-ting, LI Wen-qiao, LU Ning, et al. Characteristics of Loss and Hazards of Yushu Earthquakes with $M_s = 5.0$, 5.6 and 5.4 in Qinghai Province, 2006 [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1 (4): 371 ~ 377.

D-IN SAR OBSERVATION OF EARTH SURFACE DEFORMATION IN THE $M_s7.1$ YUSHU EARTHQUAKE

YAO Xin, ZHANG Yong-shuang, YANG Nong, XIONG Tan-yu

(Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazards, Ministry of Land and Mineral Resource;
Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: A “Two Paths + DEM” interferometric process was made for the PALSAR SAR data before (Jan. 15, 2010) and after (Apr. 17, 2010) the Yushu $M_s7.1$ Earthquake, which yielded a high-quality co-seismic InSAR strip image and absolutely surface deformation. Based on the deformation scale, deformation magnitude and deformation gradient, in combination with tectonic setting of the area, the following conclusions can be drawn: (1) Yushu earthquake triggered a 70-km NWW-extending mutation belt, with a southern section showing greater dislocation and deformation gradient, which will induce surface ruptures, and No. 4 segment in northwestern part showing weaker deformation and no ruptures on the ground surface. (2) The SAR motive directions from both sides of mutation belt indicate a dominant sinistral movement of seismogenic faults. (3) The macro-epicenter is located on the mutation belt 16km northwest of Yushu County. The present InSAR interpretations match well with the seismic mechanics, field investigations and geomorphology features from the China Earthquake Networks Center, and can provide better support for rapid evaluation to earthquake hazard and accurately tracing surface track of seismogenic fault.

Key words: Yushu Earthquake; InSAR; Surface Rupture; Coseismal seismic Deformation