

石晓春, 王长委, 余鹏飞, 等. 玛尼地震的 InSAR 形变研究与模拟[J]. 华南地震, 2019, 39 (2):12-18. [SHI Xiaochun, WANG Changwei, YU Pengfei, et al. InSAR Deformation Research and Simulation of Mani Earthquake[J]. South China journal of seismology, 2019, 39(2):12-18]

## 玛尼地震的 InSAR 形变研究与模拟

石晓春<sup>1</sup>, 王长委<sup>2</sup>, 余鹏飞<sup>3</sup>, 杜志彪<sup>4</sup>

(1.广东省国土资源测绘院, 广州 510500; 2.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 3.中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 武汉 430071; 4.广州港工程管理有限公司, 广州 510730)

**摘要:** 采用欧洲空间局 ERS-2 的星载干涉雷达数据, 选取 1997 年 11 月 8 日  $M_w$ 7.6 级玛尼地震作为研究对象, 采用了差分干涉方法, 在通过对覆盖同一地区的 SAR 数据进行差分干涉处理, 得到了玛尼地震的视线向同震形变场。经研究发现: 该地震形变场呈长轴近北东东向不规则椭圆形分布, 地表破裂带长度约为 130 km, 发震断层走向约为  $78^\circ$ , 断裂为左行走滑特征。断层以南为隆起区, 在发震断层附近最大视线向隆起位移量为 113.6 cm, 断层以北为沉降区, 最大视线向沉降位移量为 170.4 cm。基于 Okada 模型实现了具有复杂结构的 4 段断层段参数的 InSAR 形变场数据模拟, 获得断层的最大走滑为 6 m, 估计出玛尼地震的标量地震矩  $M_0$  为  $2.69 \times 10^{20}$  Nm, 计算得到的矩震级  $M_w$  为 7.6。证明了研究方法的正确性和研究结论的可靠性。

**关键词:** 合成孔径雷达干涉测量 (InSAR); 玛尼地震; 同震形变; 弹性半空间位错理论

**中图分类号:** TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662(2019)02-0012-07

**DOI:** 10.13512/j.hndz.2019.02.003

## InSAR Deformation Research and Simulation of Mani Earthquake

SHI Xiaochun<sup>1</sup>, WANG Changwei<sup>2</sup>, YU Pengfei<sup>3</sup>, DU Zhibiao<sup>4</sup>

(1. Institute of Surveying and Mapping, Lands and Resource Department of Guangdong Province, Guangzhou 510500, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China; 4. Guangzhou Port Engineering Management Co. Ltd, Guangzhou 510730, China)

**Abstract:** By using the spaceborne Interferometric Radar Data of ESA ERS-2, taking the Mani  $M_w$ 7.6 earthquake on November 8<sup>th</sup> 1997 as the research object, the line-of-sight co-seismic deformation field of the Mani earthquake is obtained by using differential interferometric method to process the SAR data covering the same area. Results show that the seismic deformation field is irregular elliptical distribution along the long axis

**收稿日期:** 2017-12-27

**基金项目:** 2018 年省级促进经济发展专项资金(GDME-2018E005); 广东省省级科技计划项目(2018B020207002)

**作者简介:** 石晓春(1976-), 男, 高级工程师、注册测绘师, 主要从事遥感及地理国情监测应用研究。

**E-mail:** 6030232@qq.com.

**通讯作者:** 王长委(1977-), 男, 博士, 副教授, 主要从事摄影测量与遥感研究。

**E-mail:** changwei\_wang@scau.edu.cn.

near NE and east direction, with a surface rupture zone length about 130 km, the strike of the seismogenic fault is about  $78^\circ$ , and the fault is characterized by left strike-slip. The south of the fault is the uplift area, has a maximum line-of-sight uplift displacement near the seismogenic fault as 113.6 cm, and the north of the fault is the subsidence area, has a maximum line-of-sight settlement displacement is 170.4 cm. Thanks to Okada model, the InSAR deformation field data of four fault segments with complex structure parameters are simulated, the maximum strike slip of the fault is got as 6 m, and the scalar seismic moment  $M_0$  of the Mani earthquake is estimated to be  $2.69 \times 10^{20}$  Nm, and the moment magnitude  $M_w$  is calculated as 7.6. All of the above results prove that the research methods are correct and research conclusions are reliable.

**Keywords:** Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR); Manyi earthquake; Co-seismic deformation; Dislocation theory in elastic half space

## 0 引言

1997 年 11 月 8 日的玛尼地震是 20 世纪 90 年代我国境内发生的强震之一, 之后相继发生了 2001 年昆仑山地震和 2010 年玉树地震, 这些地震都发生青藏高原北部, 通过对该地区地震地表破裂的几何学和运动学特征以及与此相关的块体运动学图像研究, 将促进深入研究其发震和形变机理, 更好地揭示该地区强震活动的触发规律并推动青藏高原变形和动力学的研究, 对于分析将来一段时期内我国的地震发展规律具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。

近年来, 许多学者在玛尼地震形变研究中取得较多成果, 在玛尼地震的同震形变场研究方面, Peltzer 等利用 InSAR 获取了同震形变场, 使用简化的断层模型给出了非线性弹性形变场的地球物理解释<sup>[5]</sup>。单新建等在获取了玛尼地震同震位移场的基础上采用弹性半空间介质中的位错模型, 反演了玛尼地震发震断层某些几何学和运动学性质<sup>[6]</sup>, 张景发等通过测量玛尼地震震前一年形变和同震形变差分图, 得到了地震断层的形变量和其力学环境<sup>[7]</sup>, 邵芸等利用 InSAR 数据提取区域形变场的研究, 从得到的变化检测条纹中可识别出地表破裂带, 定量推算出震中周围和断裂带附近的变形情况, 并与地面调查结果进行比较<sup>[8]</sup>。在玛尼地震的 InSAR 研究中, 由于所采用的数据、处理方法以及得到的结果不一致而存在争议, 所得形变场变化检测条纹图的解释存在多解性, 不能很好确定形变机制<sup>[9-10]</sup>, 需要做进一步的研究。

本文通过模拟干涉相位图与实际观测干涉相位图不断拟合, 获取的地表破裂带几何学、运动学最佳参数, 确定玛尼地震地表破裂带的几何及变形机制, 加深对玛尼地震发震前后形变场及发震断层的地球动力学认识。

## 1 地质构造背景

玛尼地震在地质上位于羌塘块体北部边界的玛尔盖茶卡断层上, 羌塘地块是青藏高原的主体部分, 也是世界上海拔最高、气候条件最恶劣的高原。该断裂带上 1973 年发生过中扎俄久多 7.3 级地震, 11 月 8 日玛尼地震以来至 12 月 3 日, 在羌塘块体及邻近地区相继发生 11 次 5 级左右余震, 由此看来, 这是一条以强震活动为主的活断层。从遥感图像上看, 玛尔盖茶卡断层走向为北东东向, 在玛尔盖茶卡湖和朝阳湖一段, 长约 50 km, 为最新沉积盆地区, 现代湖泊、沼泽十分发育, 但从卫星影像上仍能清楚地分辨出线性刻蚀痕迹, 表明断层破裂带未受较长时间的侵蚀, 该断裂全新世以来活动一直十分强烈<sup>[11-12]</sup>。

1997 年 11 月 8 日 10 时 2 分 55.4 秒(UTC)在我国西藏自治区那曲地区的玛尼乡发生了  $M_w 7.6$  地震。中国全国地震台网测得这次地震的震中位置为  $87.33E, 35.26N$ , 震源深度 40 km, 震级  $M_s 7.4$ ; 而美国国家地震信息中心(NEIC)测定的这次地震的发震时间为 10 时 2 分 54.9 秒(UTC), 震中位置为  $87.37E, 35.11N$ , 震源深度 35 km, 震级  $M_s 7.9$ <sup>[13]</sup>。哈佛大学给出了矩心矩张量反演结果, 矩心发震时间为 10 时 3 分 7.8 秒(UTC), 矩心位置为  $87.19^\circ E, 35.28^\circ N$ , 深度 15.0 km; 其发震应力场的 P 轴和 T 轴以水平为主, T 轴的方位角为  $126^\circ$ , 倾角为  $11^\circ$ ; P 轴的方位角为  $217^\circ$ , 倾角为  $5^\circ$ ; 两组断层面解分别为: 节面 I, 走向  $262^\circ$ , 倾角  $79^\circ$ , 滑动角  $4^\circ$ ; 节面 II, 走向  $171^\circ$ , 倾角  $86^\circ$ , 滑动角  $169^\circ$ 。标量地震矩为  $M_0=2.8 \times 10^{20}$  N·m, 矩震级  $M_w=7.6$ 。Velasco 等得出玛尼地震的震源机制解为走向  $225^\circ$ , 倾角  $76^\circ$ , 滑动角  $175^\circ$ , 标量地震矩  $2 \times 10^{20}$  Nm, 其中大部分能量释放于地壳 15 km 深度以上<sup>[14]</sup>。

## 2 InSAR 数据及同震形变场

根据欧空局(ESA)提供的数据目录,选取表 1 和表 2 的 SAR 数据用于玛尼地震的形变场研究,地形数据来自 SRTM 数字高程模型,轨道信息采用 Delft 大学提供的精密星历。

利用美国 JPL 研发的 ROI\_PAC 软件,采用两通法对以上原始数据进行干涉计算,相位解缠由斯坦福大学的 SNAPHU 程序完成,该算法以统计方法为基础,以最大后验概率求解最佳相位模糊度,可以完成整幅干涉图的相位解缠,得到仅包含差分干涉相位的干涉相位图(图 1 和图 2)。

表 1 1996-04-10-1997-12-02 数据参数

Table 1 Data parameter from 1996-04-10 to 1997-12-02

序号	卫星	获取时间/(年-月-日)	轨道号	景号	轨迹号	垂直基线/m	时间基线/d
1	ERS-2	1996-04-16	5169	2889	305	-140	595
2	ERS-2	1997-12-02	13 686	2889	305		
3	ERS-2	1996-04-16	5169	2907	305	-157	595
4	ERS-2	1997-12-02	13686	2907	305		

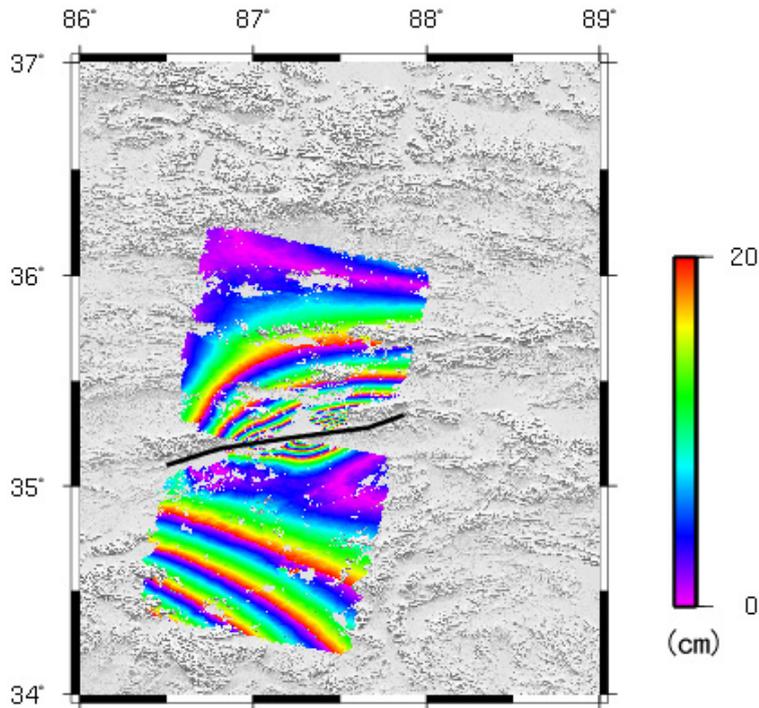


图 1 1996-04-16-1997-12-02 干涉相位图

Fig.1 Interferometric phase diagram from 1996-04-16 to 1997-12-02

表 2 1997-08-19-1998-01-06 数据参数

Table 2 Data parameter from 1997-08-19 to 1998-01-06

序号	卫星	获取时间/(年-月-日)	轨道号	景号	轨迹号	垂直基线/m	时间基线/m
1	ERS-2	1997-08-19	12 183	2889	305	-100	140
2	ERS-2	1998-01-06	14 187	2889	305		
3	ERS-2	1997-08-19	12 183	2907	305	-93	140
4	ERS-2	1998-01-06	14 187	2889	305		

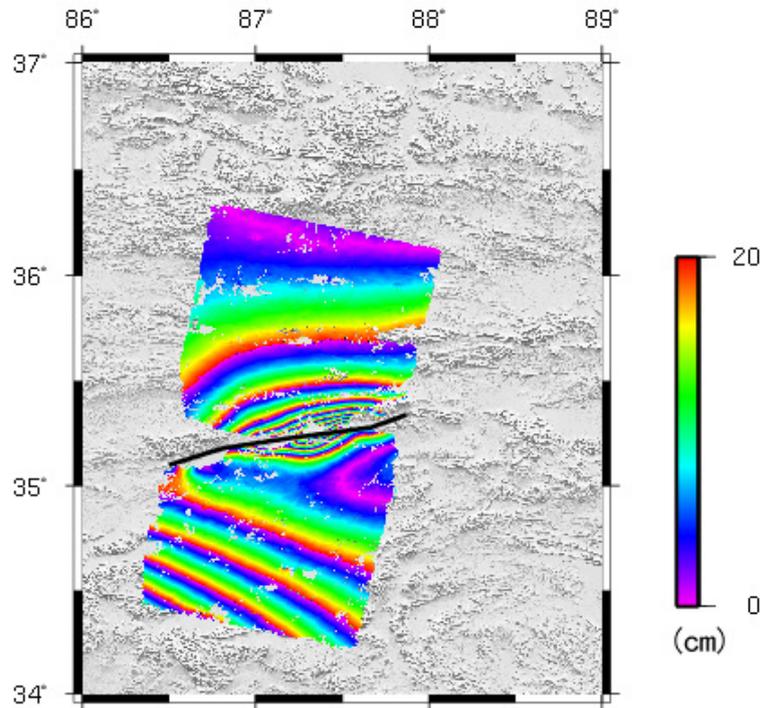


图 2 1997-08-19~1998-10-06 干涉相位图

Fig.2 Interferometric phase diagram from 1997-08-19 to 1998-10-06

从干涉相位图(图 1 和图 2)上可以分析, 玛尼地震沿着玛尔盖查卡一若拉错断裂带发生了地表破裂, 破裂带长度约为 130 km, 这与徐锡伟等野外考察 120 km 地表破裂带和单新建等(2002)的 110 m 破裂带结果基本一致<sup>[5]</sup>, 比 Peltzer 等(1999)的 170 m 结果小。Peltzer 等人的结果可能将断层东西两端非破裂的变形带计入断层破裂带长度, 引起地表破裂带偏大。

从干涉相位图的分布特点可以看出, 条纹以北东东向发震断层—玛尔盖茶卡断层为中心分布, 且基本与发震断层平行。通过量测, 发震断层走向约为 78°, 这一结果与玛尼地震的野外考察、干涉结果和余震分布相一致<sup>[5,13,15]</sup>。

在干涉相位图中, 一个颜色周期代表实际地表在视线向方向上的形变量是 20 cm, 即一个色周代表 20 cm 形变量。从图可以看出, 玛尼地震形变场呈长轴近北东东向(NEE)不规则椭圆形, 明显反映出形变场由北东东向线性边界控制, 向两边形变逐渐发散趋缓, 最大形变中心沿断层分布。沿着玛尔盖查卡断裂带两侧的条纹基本上与断裂带平行, 随着距离断裂带由远及近, 由疏缓变得密集, 即变形梯度加大, 为典型的剪切破裂造成的纹理图案。从该条断裂两侧条纹分布样式, 图像左上部条纹向北西向发散, 右下部条纹向南东

向发散, 形成左行扭动势态, 可判断出断裂具有明显的左行走滑特征。

根据地震的特点, 该地震的形变以走滑形式为主, 即认为地表形变主要沿水平方向, 且平行于断层的走向方向。根据地震的远场效应, 离震中距离远的区域变形量近似等于 0。从处理结果来看, 断层以南为隆起区, 在发震断层附近最大视线向隆起位移量为 113.6 cm, 断层以北为沉降区, 最大视线向沉降位移量为 170.4 cm。

### 3 同震形变场模拟

利用 Okada 弹性半空间位错模型<sup>[6]</sup>, 模拟 InSAR 测定同震形变场。本文所采用的位错模型设计断层参数: 断层中心位置、走向、埋深、倾角、倾滑量、长度、及宽度。模拟计算采用 RNGCHN 软件提供的算法<sup>[7]</sup>, 以哈佛大学 CMT 解为初始模型, 以 InSAR 实测的变形场为依据, 通过调整断层长宽度、中心点地理坐标和滑移参数进行系列正演计算。

#### 3.1 单段模拟

根据已有的地质、地球物理及前人的研究成果, 首先进行单段断层模拟地表的同震形变。断层参数见表 3, 模拟结果见图 3。

表 3 单段模拟断层参数

Table 3 Single stage simulation of fault parameters

分段序号	地理东/(km)	地理北/(km)	走向/(°)	埋深/(km)	倾角/(°)	U1/(mm)	U2/(mm)	U3/(mm)	长度/(km)	宽度/(km)
S0	50	120	78	32	84	-5000	200	0	130	35

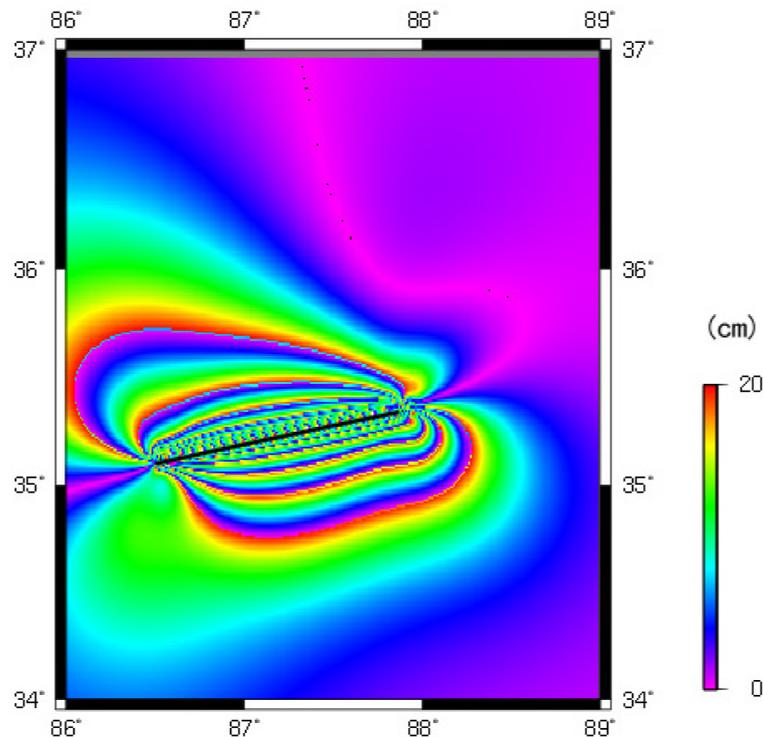


图 3 单段模拟

Fig.3 Single stage simulation

图 3 是根据表 3 得到的每个色周为 20 cm 的干涉相位图, 与 InSAR 干涉测量图相比, 模拟所得到的干涉形变图在干涉相位图整体形态、方向等方面有一定的相似性, 但是与断层附近的走滑特征有一定的差别。

### 3.2 模拟结果

单段模拟得到的断层深度、宽度、总长度、滑移矢量比较粗糙, 因此用单段发震断层的破裂特征来模拟玛尼地震破裂特征和形变场分布特征

是不充分的。根据玛尼地震同震形变场干涉图(图 1 和图 2), 结合野外调查结果等资料, 有必要对断裂分段进行更深入的研究。分段组合模拟地表干涉形变图(图 4)是由断层参数(表 4)得到的。

图 4 是根据表 4 得到的每个色周为 20 cm 的干涉相位图, 与 InSAR 干涉测量图相比, 在干涉相位图整体形态、方向等方面非常相似性, 而且显示出整体左向扭转形态, 表现出发震断层具有强烈的左行走滑特征。因此用 4 段分段发震断层的破裂特征来模拟玛尼地震破裂特征和形变场分布特征是较为接近的。

表 4 分段模拟断层参数

Table 4 Segmentation simulation of fault parameters

分段序号	地理东/(km)	地理北/(km)	走向/(°)	埋深/(km)	倾角/(°)	U1/(mm)	U2/(mm)	U3/(mm)	长度/(km)	宽度/(km)
S1	49.78	118.64	71	18	82	-4000	100	0	30	21
S2	77.56	126.78	83	32	85	-6000	200	0	39	35
S3	115.58	132.33	81	30	83	-6000	200	0	40	32
S4	155.28	137.69	69	10	81	-5000	100	0	21	12

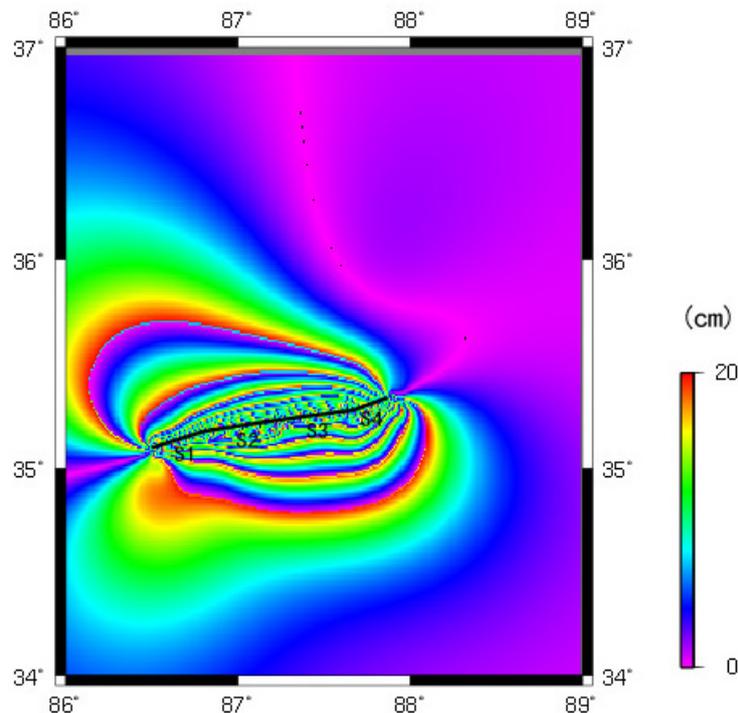


图4 分段组合模拟

Fig.4 Segmentation combination simulation

### 3.3 模拟形变场分析

根据 Kanamori 经验公式<sup>[18]</sup>, 取破裂面 S3 为主震破裂面, 断层的最大走滑为 6 m, 剪切模量  $\mu$  取 35 GPa, 在统一计量单位后, 并依以上模型估计出玛尼地震的标量地震矩  $M_0$  为  $2.69 \times 10^{20}$  Nm。这与不同学者所用不同方法得到的震源机制结果  $(1.4 \sim 3.4) \times 10^{20}$  Nm<sup>[13]</sup> 基本一致, 与哈佛大学的反演结果  $(2.8 \times 10^{20}$  Nm) 尤为接近。根据测定的标量地震矩计算得到的矩震级  $M_w$  为 7.6, 与哈佛大学测定的矩震级  $M_w$  为 7.6 的结果相同。

## 4 结语

从 InSAR 处理结果来看, 玛尼地震同震形变场呈长轴近北东东向 (NEE) 不规则椭圆形, 明显反映出形变场由北东东向线性边界的控制, 向两边形变逐渐发散趋缓, 最大形变中心沿断层分布, 发震断层走向约为  $78^\circ$ , 断层以南为隆起区, 在发震断层附近最大视线向隆起位移量为 113.6 cm, 断层以北为沉降区, 最大视线向沉降位移量为 170.4 cm, 且地震断裂为左行平移性质。同震形变场单段模拟得到的断层深度、宽度、总长度、滑移矢量比较粗糙, 地震活动很难以简单的模型进

行刻画, 而分段位错模型可以较好地模拟断层的运动特性。模拟得到该地震的标量地震矩  $M_0$  为  $2.69 \times 10^{20}$  Nm, 计算得到的矩震级  $M_w$  为 7.6, 结果与国际上其它著名研究机构公开发表的结果相一致, 表明论文中的数据处理方法、地球物理模型及参数是合理可靠的。

### 参考文献:

- [1] 乔学军, 王琪, 杜瑞林, 等. 昆仑山口西  $M_s 8.1$  地震的地壳变形特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(4): 6~11.
- [2] 孙建宝, 徐锡伟, 石耀霖, 等. 东昆仑断裂玛尼段震间形变场的 INSAR 观测及断层滑动率初步估计[J]. 自然科学进展, 2007(10)1361-1370.
- [3] 沈强, 乔学军, 王琪, 等. 中国玉树  $M_w 6.9$  地震 InSAR 地表形变特征分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(03): 5-9.
- [4] 柴荣建, 陈大庆. 基于迁移辅助投影线的中国大陆主要块体强震迁移特征初步研究[J]. 华南地震, 2017, 37(S1): 41-47.
- [5] Peltzer G, Frederic Crampe and Geoffrey King. Evidence of Nonlinear Elasticity of the Crust from the  $M_w 7.6$  Mani (Tibet) Earthquake[J]. Science, 1999(286): 272-276.
- [6] 单新建, 马瑾, 柳稼航, 等. 星载 D-INSAR 技术及初步应用——以西藏玛尼地震为例[J]. 地震地质, 2001(03): 439-446+485.
- [7] 张景发, 刘钊. INSAR 技术在玛尼强震区的应用[J]. 清华

- 大学学报(自然科学版),2002,42(6):847-850.
- [8] 邵芸,谭衢霖,刘浩,等. 雷达差分干涉测量技术及其应用研究——以1997年西藏玛尼7.9级地震区域形变测量为例[J]. 地球物理学报,2002,45(S):205-213.
- [9] 张晓亮,陆明勇,江在森,等. 玛尼 $M_s$ 7.9级地震三维动态模拟及余震解释[J]. 地球物理学进展,2008(05):1367-1376.
- [10] 孙鑫喆. 玛尼地震与玉树地震发震断层的破裂特征与复发模型[D]. 北京:中国地震局地质研究所,2016.
- [11] 李建华. 利用卫星图像研究西藏羌塘及邻区的断裂活动性[J]. 地震地质,1998,20(3):201-207.
- [12] 单新建,李建华,张桂芳. 1997年玛尼7.9级地震的构造环境和地表破裂带特征[J]. 地球物理学报,2006(03):831-837.
- [13] 许力生,陈运泰. 1997年中国西藏玛尼 $M_s$ 7.9级地震的时空破裂过程[J]. 地震学报,1999,21(5):449-459.
- [14] Velasco, A.A., Ammon, C.J. et al. Broadband source modeling of the November 8, 1997, Tibet ( $M_w=7.5$ ) earthquake and its tectonic implications[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B12): 28:065-28+080.
- [15] 徐锡伟,宋方敏,杨晓平,等. 中国大陆地表破裂型潜在震源区的地震地质学综合判定[J]. 震情研究,2000,44(1):14-26.
- [16] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismological Society of America[J], 1985, 75(4):1135-1145.
- [17] Peltzer G, Rosen P. Surface displacement of the 17 May 1993 Eureka Valley, California, Earthquake observed by SAR interferometry[J]. Science, 1995(268):1333-1336.
- [18] H.Kanamori. The energy release in great earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 1997(82):2981-2987.