

文章编号: 0253-3782(2004)05-0474-07

# 2001 年昆仑山口西 8.1 级地震同震形变场特征的初步分析<sup>\*</sup>

单新建<sup>1)</sup> 柳稼航<sup>1)</sup> 马 超<sup>1, 2)</sup>

1) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室

2) 中国太原 030024 太原理工大学

**摘要** 利用差分干涉雷达测量技术获取的宏观震中区的同震形变场, 结合对地震活动性、震源机制、野外考察等资料分析, 对昆仑山口西 8.1 级地震同震形变场特征进行了研究。结果表明: 宏观震中位于库赛湖东北侧, 宏观震中区发震断层可分为两个形变中心区域, 其中西段长约 42 km, 东段长约 48 km, 整个发震断层主破裂段长 90 km; 由干涉形变条纹分布格局可清楚地判断出发震断层的左旋走滑特征; 断层两盘变形特征不同, 南盘变形程度明显大于北盘; 宏观震中附近最大斜距向位移量为 288.4 cm, 最小斜距向位移量为 224.0 cm, 宏观震中发震断层最大左旋水平位错为 738.1 cm, 最小地面左旋水平位错为 551.8 cm。

**关键词** 合成孔径雷达干涉技术 昆仑山口西 8.1 级地震 同震形变场

**中图分类号:** P542      **文献标识码:** A

## 引言

2001 年 11 月 14 日, 昆仑山口西青海和新疆交界处发生了 8.1 级强烈地震。该地震是自 1951 年 11 月 18 日西藏当雄 8.0 级大地震以后, 在我国大陆发生的震级最大的地震事件。此次大地震发生在东昆仑构造带上。该构造带是青藏高原内部一条古老的板块缝合带, 是将青藏高原划分为南、北两大部分的重要构造带, 在青藏高原的变形及其动力学演化过程中起着十分重要的作用。此次大震展示了极为丰富的现象, 提出许多值得深入研究的科学问题。据我国地震台网测定的主震震中位置与哈佛大学测定的相距甚远, 在 200 km 以上, 发震时刻相差近 60 s, 其原因何在? 另外, 沿整个地震地表破裂带的位移变化和其它地表破坏现象在带上的不同段落有多个增强和起伏(徐锡伟等, 2002; 赵瑞斌等, 2002), 宏观震中在哪里? 发震断层主破裂段的形变特征如何? 何为发震断层主动盘? 弄清这些问题, 将使我们对这次大震的震源破裂过程、地表破裂特征、同震变形过程有更深入的认识。1986~1990 年由青海省地震局及地壳应力研究所组织力量对东昆仑南缘活动断裂带库赛湖以东约 1 000 km 地段进行了全面的实地调查和综合研究, 获得了一些有关这一活动断裂带的部分资料(任金卫等, 1993)。任金卫等(1993)沿西大滩断裂获得了 100 多个位移测量数据, 由此推断该断裂带第四纪中晚期左旋走滑速率达 10 mm/a(青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所, 1999)。

\* 国家科技部社会公益研究专项(2002DIA1001)及地震科学联合基金(102096)资助。

2003-03-17 收到初稿, 2003-06-17 收到修改稿, 2003-08-08 决定采用。

由于地震震区在海拔4 500~5 000 m以上, 气候干燥寒冷, 高寒缺氧, 区内沼泽密布, 河流纵横, 恶劣的自然环境给地表破裂带变形特征及分段研究工作带来一定困难。近年发展的差分雷达干涉技术(D-InSAR, 简称差分干涉雷达)具有全天候全天时作业优势, 与其它离散点测量技术相比, 其测量结果具有连续的空间覆盖优势, 是一项前所未有的、极具发展潜力的空间对地观测新技术。国内外学者已应用差分干涉测量技术对1992年Landers地震(Massonnet *et al.*, 1993)、1995年希腊Grevena地震(Meyer *et al.*, 1995)、1999年土耳其地震(Michel, Avouac, 2002)、1997年西藏玛尼地震(Peltzer *et al.*, 1999; 单新建等, 2002)、1998年张北地震(王超等, 2000)等进行了同震形变研究, 获取了地表破裂带空间分布特征及破裂长度、断层分段及各段形变差异等重要地表破裂面参数。本研究根据获取的地震宏观震中区连续干涉形变场, 结合地震活动性、震源机制、野外考察等资料, 确定了这次大震的震源特征、宏观震中、主破裂段分段及变形特征、断层两盘形变差异等问题。

## 1 差分干涉测量的理论模型

设在同一地区有两幅干涉图: 一幅为事件(地震、滑坡等)前两景SAR图象通过干涉处理所得(包含了场景的地形信息); 另一幅是由事件前后两景SAR干涉处理所得(包含了场景的地形信息和微量地形变信息)。在此基础上, 把两幅干涉图象进行差分干涉处理(differential InSAR), 便可得出该地区的斜距向微量地形变(Zebker *et al.*, 1994)。

$$\frac{\phi' - B'_\parallel}{B_\parallel} \phi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r_d \quad (1)$$

其中,  $\phi'$ 是地震前后两景SAR图象的相位差,  $\phi$ 是地震前两景SAR图象的相位差,  $B_\parallel$ 是地震前两卫星天线基线距的斜距向(视线方向)分量,  $B'_\parallel$ 是地震前后两卫星天线基线距的斜距向(视线方向)分量,  $\lambda$ 为雷达波长,  $\delta r_d$ 为地表微量形变引起的斜距向变化量。

由干涉基本理论(Rodriguez, Martin, 1992)可以得到地表斜距向形变变化量与干涉相位变化关系

$$\frac{d\delta r_d}{d\phi} = \frac{\lambda}{4\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{2} \quad (2)$$

由式(2)可知, 合成孔径雷达的测量精度与雷达波长成反比, 即雷达波长越小, 测量精度就越高。但同时我们知道, 雷达波长越小, 两幅SAR图象的相干性就越差, 因此两者又是相互制约的。目前我们所使用的星载雷达波长一般在几厘米~几十厘米之间, 都能充分保证相干条件。此次所使用的ERS-2雷达资料波长为56 mm, 即一条干涉条纹代表28 mm的卫星视线向地形变量。考虑到一个干涉条纹为红、绿、蓝3色, 因此, D-InSAR实际测量精度应在9 mm左右。

## 2 昆仑山口西8.1级地震特征分析

东昆仑活动断裂带由一组北西西、北东东和近东西向左旋逆走滑断层构成, 总长度超过2 000 km。该断裂带以昆仑山口为界分为东西两段(图1): 西段称为木孜塔格—鲸鱼湖断裂带。该断裂带始于新疆境内的琼木孜塔格峰, 向东沿近东西延伸, 到鲸鱼湖、布卡达板峰、库赛湖一带, 再东延至青藏公路的昆仑山口, 长度大于1 000 km; 东段称为库玛断裂带, 由昆仑山口向东到托索湖、玛多、玛沁, 隐没在四川西北的高原沼泽盆地下, 长900

多千米(沈军等, 2002). 近百年来东昆仑活动断裂带的阿拉克湖—托索湖—东倾沟段曾先后发生过1902年11月4日秀沟7.0级地震、1937年1月7日花石峡7½级地震、1963年4月19日阿拉克湖东7.0级地震和1971年3月24日红水川6.3级地震. 此次8.1级地震是该断裂带上发生的第四次震级大于7级的地震, 沿断裂带先后形成有近千公里的地震破裂带.

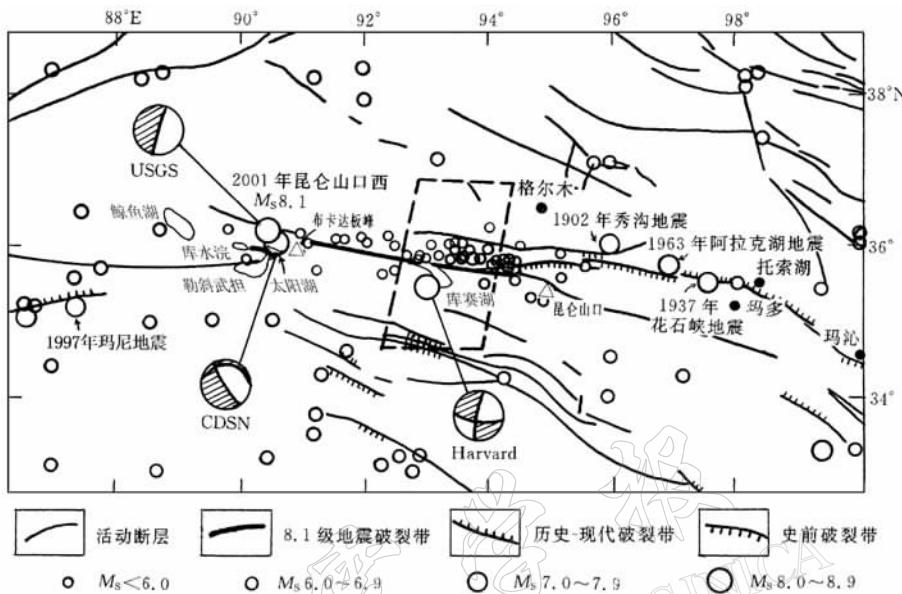


图1 东昆仑断裂带地震(1900~2002年)及活动构造分布图

表1 不同机构给出的地震及震源机制解参数

(°)

资料来源	地震时间 年-月-日	地震参数					节面I			节面II			P轴		T轴	
		发震时刻 时:分:秒	$\lambda_E$	$\varphi_N$	震级	深度 /km	走向	倾角	滑动方向	走向	倾角	滑动方向	方位	俯角	方位	俯角
CDSN*	2001-11-14	17:26:09.8	90.59	35.97	8.1	11	273	11	-140	144	83	-81	63	51	226	37
USGS**	2001-11-14	17:26:10.2	90.50	36.01	8.1	5	32	4	-76	198	86	-91	107	49	289	41
Harvard**	2001-11-14	17:27:10.8	92.75	35.54	7.9	15	96	54	-7	190	84	-144	59	29	318	20

注: \* 资料来源中国数字地震台网中心网站: <http://www.ccdsn.seis.ac.cn>; \*\* 资料来源中国国家数字地震台网分中心网站: <http://www.csndmc.ac.cn>

昆仑山口西8.1级地震发生后, 中国数字地震台网(CDSN)、哈佛大学(Harvard)、美国地质调查局(USGS)等都给出了地震参数及震源机制解(图1、表1). 从表1可以看出, CDSN和USGS给出的地震参数十分接近, 但与哈佛大学给出的差异较大. 这是由于CDSN和USGS采用P波初动进行地震定位, 表示地震破裂起始点; 而哈佛大学采用的矩张量定位, 震中位置表示矩心点, 即破裂最大的位置. 从主震震中位置看, 哈佛大学给出的震中位置比CDSN和USGS向东偏移了近2.2°. 从发震时间上看, 哈佛大学给出的发震时刻比CDSN和USGS晚了近60 s. 因此, 我们可以初步得出, 昆仑山口西8.1级地震至少有两次地震事件组成: 第一次事件发生在北京时间11月14日17时26分10秒左右, 位于布卡达板峰附近; 第二次事件发生在50~60 s以后, 位置在库赛湖附近, 距第一次事件约2.2°左右. 从震源机制解看, 哈佛大学给出的两个节面分别为WNW向和近南北向, 根据断层走向及余震资料, 可以判定节面I为地震主破裂面, 与发震断层WNW走向一致. 而

CDSN 和 USGS 给出的震源机制解与前者差异较大, 表明第一次破裂较为复杂。据野外考察资料(徐锡伟等, 2002), 昆仑山口西 8.1 级地震的地表同震破裂带全长约 350 km, 沿 WNW 向分布, 以左旋剪切为主, 最大左旋位移量达 6.0 m, 位于库赛湖东北侧, 地表形变相当剧烈。由此看来, 该地震的发震断层面为北西西—近东西方向, 宏观震中位于库赛湖东北侧, 断层性质主要为左旋走滑断层, 与地质背景和应力场特征相符合。

图 1 给出了 2001 年 11 月 14 日~2002 年 8 月 30 日昆仑山口西 8.1 级地震的余震分布(中国数字地震台网)。可以看出, 主震(CDSN, USGS)位于断层西部和断层中部(Harvard), 余震沿北西西—近东西向分布, 长约 400 km。这进一步说明, WNW 向东昆仑断裂是这次地震的发震断层。

### 3 昆仑山口西 8.1 级地震干涉形变场图象

昆仑山地区气候干燥, 植被稀少, 且地表有强烈的同震位移, 非常适合利用 D-InSAR 技术提取地表同震位移场。我们选购了经度在  $92.6^{\circ}\sim 93.6^{\circ}$ E、纬度在  $34.2^{\circ}$ N~ $37.9^{\circ}$ N 范围内的 ERS-2 卫星 SAR 数据, 分为南北相邻的 4 个景区(2907, 2889, 2871, 2853), 采用 D-InSAR 技术获取了该地震的同震形变场(图 2 为中间两景干涉形变场)。

### 4 结果分析

1) 由图 2 清晰地反映出昆仑山口西 8.1 级地震地表同震形变场分布。形变场占满了高 200 km、宽 90 km 的图象。从干涉条纹的分布特点可以看出, 条纹以北西西向发震断层—东昆仑断层为中心呈基本对称分布, 且基本与发震断层平行。从干涉条纹的分布格局可以看出, 图象左上部条纹向北西向发散, 右下部条纹向南东向发散, 形成左旋扭动势态, 显示出发震断层具有明显的左旋走滑特征。通过量测, 发震断层走向为 N95°E。这一结果与野外考察一致(徐锡伟等, 2002)。

2) 从断层附近干涉形变场可以看出, 有两个形变中心区域(见图 3 中  $M_1$  和  $M_2$ ), 根据干涉形变场包络线  $M_1$  和  $M_2$  上下起伏的特点来看, 最大水平位移应在  $M_2$  区域内。在两形变中心连接点  $J_1$  处(见图 3 中  $J_1$  标记), 有明显的干涉条纹扭曲变形, 说明宏观震中发震断层可能分为两段, 每一段的断层参数不一样。通过对干涉形变图进行初步分析, 我们将发震断层分为  $F_1$  和  $F_2$  两段。其中  $F_1$  长约 42 km,  $F_2$  长约 48 km, 整个发震断层主破裂段长 90 km。

3) 从垂直于断层的形变测线剖面图来看(图 4, 5), 由远离断层点 A 或 B 至断层附近时, 形变逐步增大, 在发震断层附近形变量达到最大正值。由远离断层点  $A'$  或  $B'$  至断层附近时, 形变量逐步减小, 在发震断层附近达到最大负值。 $AA'$  和  $BB'$  测线分别代表了宏观震中区最大和最小左旋位错形变变化曲线。可以看出, 距离断层越近, 形变量变化梯度越大, 反之, 梯度就越小。从图 4, 5 可以看出,  $AA'$  测线的南盘水平位错为 408 cm, 北盘为 -330 cm;  $BB'$  测线的南盘水平位错为 315 cm, 北盘为 258 cm。可以看出, 南盘变形绝对量大于北盘, 且南盘测线长度又小于北盘, 说明南盘比北盘变形剧烈。

4) 图 6 给出了宏观震中区发震断层左旋位错分布图, 显示出宏观震中区发震断层两侧及中间形变值低, 相夹两处高的分布特点, 与图 3 形变中心区  $M_1$  和  $M_2$  相对应。 $M_1$  形变中心区域的最大左旋位错为 680.8 cm,  $M_2$  形变中心区域的最大左旋位错为 738.1 cm。两

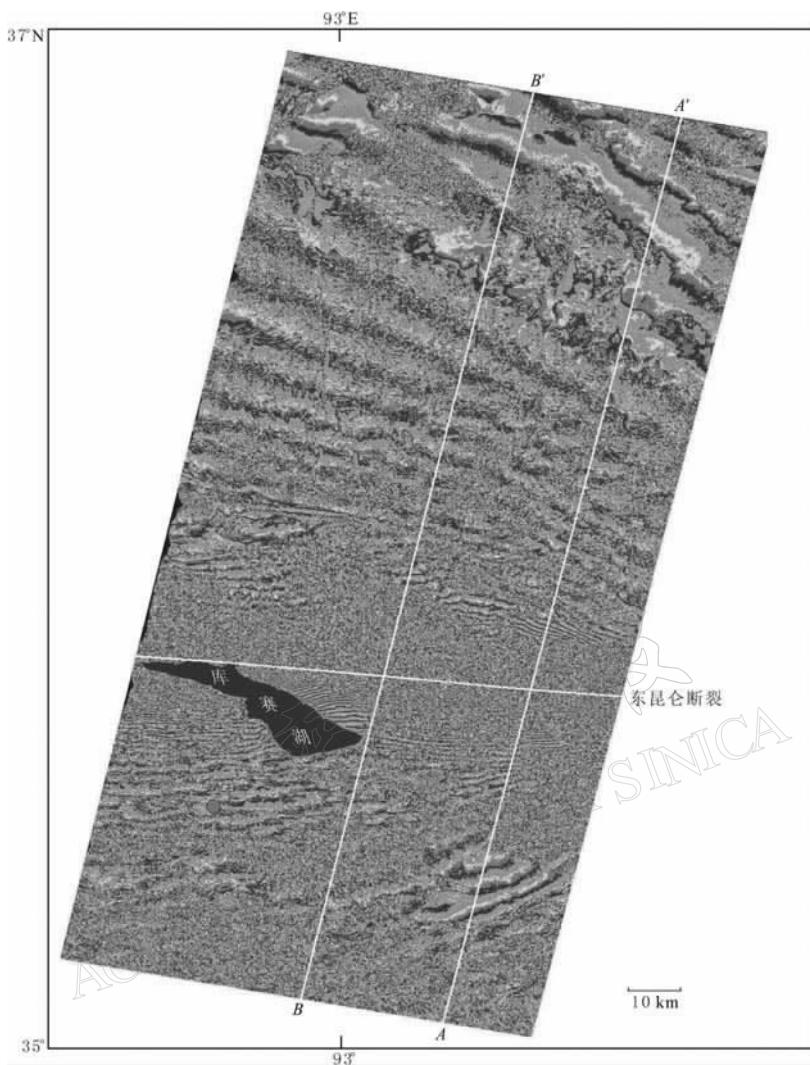


图 2 昆仑山口西 8.1 级地震地表同震形变场. (图中一个干涉条纹由兰、红、绿组成, 代表 28 mm 的斜距向形变量)

区域的最小左旋位错均为 551.8 cm. 说明  $M_2$  形变中心区域为宏观震中位置. 这一结果与野外考察一致.

## 5 结论

由于我国幅员辽阔, 自然条件复杂, 目前的形变观测技术尚有其局限性, 特别是我国西部地区形变观测台十分稀少, 而强震往往发生在西部地区. 本研究根据 D-InSAR 技术获取的昆仑山口西 8.1 级地震干涉形变场, 并结合其它资料, 对该次地震发震断层变形特征、震源特征等问题进行了研究, 取得了以下一些认识:

- 1) 干涉条纹的分布格局清楚地显示出发震断层的左旋走滑特征.
- 2) 宏观震中区发震断层可分为两个形变中心区域, 其中西段长约 42 km, 东段长约 48 km. 宏观震中位于东段区域.

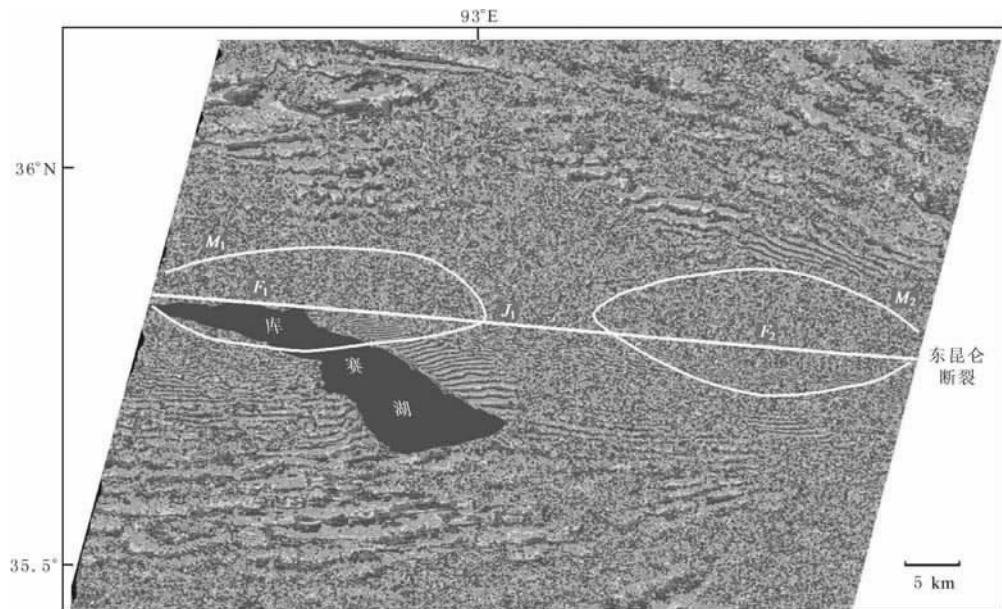


图3 昆仑山口西8.1级地震震中附近地表同震形变场(局部)

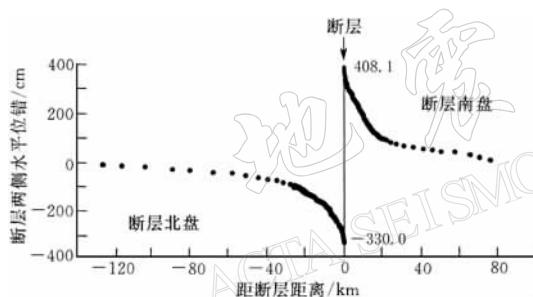


图4 AA'形变测线剖面

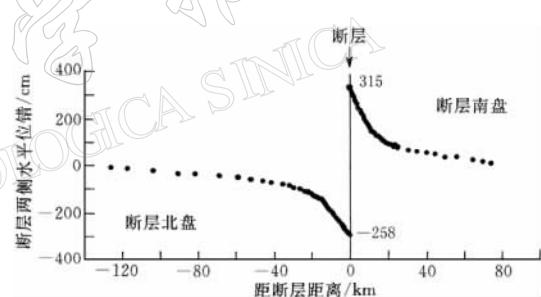


图5 BB'形变测线剖面

3) 断层两盘变形特征不同, 在剔除地形地貌的影响后, 南盘变形量及变形梯度明显大于北盘, 最大形变量也大于北盘。因此, 南盘变形程度比北盘剧烈。

4) 宏观震中发震断层最大左旋水平位错为738.1 cm, 最小地面左旋水平位错为551.8 cm。

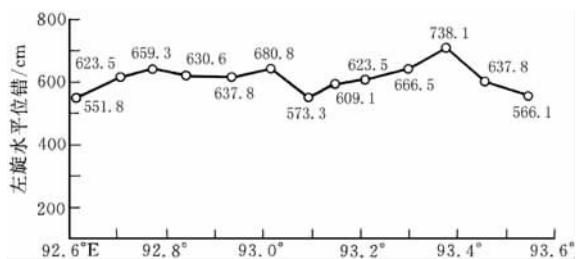


图6 宏观震中区发震断层左旋位错分布

## 参 考 文 献

- 青海省地震局, 中国地震局地壳应力研究所. 1999. 东昆仑活动断裂[M]. 北京: 地震出版社, 186  
任金卫, 汪一鹏, 吴章明, 等. 1993. 青藏高原北部库玛断裂东西大滩全新世地震变形带及其位移和速率[J]. 地震地质, 15(3): 285~288

- 单新建, 马瑾, 王长林, 等. 2002. 利用星载 D-InSAR 技术获取的地表形变场提取玛尼地震震源断层参数[J]. 中国科学, **32**(10): 837~844
- 沈军, 尹光华, 赵瑞兵. 2002. 2001 年 11 月 14 日新疆青海交界东昆仑山 8.1 级地震构造背景初探[J]. 内陆地震, **16**(1): 1~7
- 王超, 刘智, 张红, 等. 2000. 张北-尚义地震同震形变场雷达差分干涉测量[J]. 科学通报, **45**(23): 2 550~2 553
- 徐锡伟, 陈文彬, 于贵华, 等. 2002. 2001 年 11 月 14 日昆仑山库赛湖地震( $M_S$ 8.1)地表破裂带的基本特征[J]. 地震地质, **24**(1): 1~13
- 赵瑞斌, 李军, 向志勇, 等. 2002. 昆仑山口西 8.1 级地震地表破裂带西段考察[J]. 内陆地震, **16**(2): 175~179
- Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry[J]. *Nature*, **364**: 138~142
- Meyer B, Armijo R, Massonnet D, et al. 1996. The 1995 Grevena (Northern Greece) earthquake: Fault model constrained with tectonic observation and SAR interferometry[J]. *Geophys Res Letters*, **23**(19): 2 677~2 680
- Michel R, Avouac J. 2002. Deformation due to the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake measured from SPOT images[J]. *J Geophys Res*, **107**(B4): ETG2-1~2-7
- Peltzer G, Crampe F, King G, et al. 1999. Evidence of nonlinear elasticity of the crust from the  $M_w$ 7.6 Mani (Tibet) earthquake[J]. *Science*, **286**: 272~276
- Rodriguez E, Martin J. 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars[J]. *IEEE Proc of Radar and Signal Processing*, **139**: 147~159
- Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. 1994. On the derivation of coseismic displacement fields using differential radar interferometry: The Landers earthquake[J]. *J Geophys Res*, **99**(10): 19 617~19 634

## PRELIMINARY ANALYSIS ON CHARACTERISTICS OF COSEISMIC DEFORMATION ASSOCIATED WITH $M_S=8.1$ WESTERN KUNLUNSHAN PASS EARTHQUAKE IN 2001

Shan Xinjian<sup>1)</sup> Liu Jiahang<sup>1)</sup> Ma Chao<sup>2)</sup>

1) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

2) Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

**Abstract:** Based on the analysis of coseismic deformation in the macroscopic epicentral region extracted by Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR), and combined with the seismic activity, focal mechanism solutions of the earthquake and field investigation, the characteristic of coseismic deformation of  $M_S=8.1$  western Kunlunshan Pass earthquake in 2001 was researched. The study shows that its epicenter lies in the northeast side of Hoh Sai Hu; and the seismogenic fault in the macroscopic epicentral region can be divided into two central deformation fields: the west and east segments with the lengths of 42 km and 48 km, respectively. The whole fault extends about 90 km. From the distribution of interferometry fringes, the characteristic of sinistral strike slip of seismogenic fault can be identified clearly. The deformations on both sides of the fault are different with an obviously higher value on the south side. In the vicinity of macroscopic epicenter, the maximum displacement in look direction is about 288.4 cm and the minimum is 224.0 cm; the maximum sinistral horizontal dislocation of seismogenic fault near the macroscopic epicenter is 738.1 cm and the minimum is 551.8 cm.

**Key words:** InSAR;  $M_S=8.1$  western Kunlunshan Pass earthquake; coseismic deformation