

张国宏, 屈春燕, 单新建等. 2008 年 $M_s 7.1$ 于田地震 InSAR 同震形变场及其震源滑动反演. 地球物理学报, 2011, **54**(11): 2753~2760, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.005

Zhang G H, Qu C Y, Shan X J, et al. The coseismic InSAR measurements of 2008 Yutian earthquake and its inversion for source parameters. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(11):2753~2760, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.005

2008 年 $M_s 7.1$ 于田地震 InSAR 同震形变场 及其震源滑动反演

张国宏¹, 屈春燕¹, 单新建¹, 张桂芳¹, 宋小刚¹, 汪荣江², 李振洪³, 胡植庆⁴

1 地震动力学国家重点实验室, 中国地震局地质研究所, 北京 100029

2 GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany

3 Department of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

4 台湾大学地质科学系, 台北 10617

摘 要 本研究利用 InSAR 技术与 ALOS PALSAR 雷达数据, 获取了 2008 年 3 月 20 日于田 $M_s 7.1$ 地震视线向同震形变场, 并基于该数据集和限制性最小二乘算法反演了此次地震的断层滑动分布; 通过构造四大类反演方案, 详细分析了 InSAR 观测系统中的入射角与方位角对反演结果的影响. 结果表明: 入射角随点位变化对反演结果有较大影响, 使用其平均值将对破裂细节产生一定影响; 而方位角对反演结果的影响不大, 使用其平均值是一种较为理想的选择; 引入入射角与方位角变化后, 反演获得了较佳的于田地震同震滑动, 主要集中分布于 0~14 km 深度附近, 最大滑动量达 3.2 m, 矩张量为 $3.3 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 相当于矩震级 $M_w 7.0$.

关键词 于田地震, InSAR 同震形变场, 滑动分布反演, InSAR 入射角, InSAR 方位角

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.11.005

中图分类号 P227

收稿日期 2011-01-31, 2011-09-26 收修定稿

The coseismic InSAR measurements of 2008 Yutian earthquake and its inversion for source parameters

ZHANG Guo-Hong¹, QU Chun-Yan¹, SHAN Xin-Jian¹, ZHANG Gui-Fang¹,
SONG Xiao-Gang¹, WANG Rong-Jiang², LI Zhen-Hong³, HU Jyr-Ching⁴

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

2 GFZ German Research Centre for Geosciences, Telegrafenberg, D-14473 Potsdam, Germany

3 Department of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

4 Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617, China

Abstract We have obtained the coseismic deformation along line of sight of the 2008 Yutian earthquake, using ALOS PALSAR images and SAR interferometry technique. Based on the InSAR measurements and the constrained least square method, we studied the source parameters of this big normal event. Four schemes of inversion were constructed, with the emphasis on the effect to slip distribution inversion of the incidence angle and azimuth angle. Our inversion results show that the incidence angle has certain effect on the slip distribution, which means that a

基金项目 中国地震局地质研究所基本科研业务专项(IGCEA0908、LED2008A06)、国家科技支撑计划(2008BAC35B04)、国家自然科学基金(40874006)项目共同资助。

作者简介 张国宏, 男, 1978 年生, 助理研究员. 2003 年毕业于云南大学地球物理系, 现就读于中国地震局地质研究所博士研究生, 主要从事 InSAR 干涉处理及形变场数值模拟等研究. E-mail: zhanggh@ies.ac.cn

substitution of location-dependant incidence angle with constant mean incidence angle will lose some useful slip distribution on fault plane. Our inversion also shows the azimuth angle, however, has almost no obvious effect and it is an optimal choice to use the mean azimuth angle. Our most robust slip distribution can be obtained with the two parameters being location-dependant. In our favored inversion scheme using location dependant angles for both, the maximum slip reaches 3.2m. Slip is mainly confined to 0~14 km depth and no evidence of shallow slip deficit. The inverted seismic moment M_0 is 3.3×10^{19} N·m, equivalent to an event of magnitude $M_w 7.0$.

Keywords Yutian earthquake, Co-seismic deformation derived from InSAR, Slip distribution inversion, Incidence angle of InSAR, Azimuth angle of InSAR

1 引言

自 Massonnet 等^[1]利用 ERS-1 SAR 卫星数据获取了 1992 年的 Landers $M_s 7.2$ 地震的同震形变场以来,其后的十多年间 InSAR 技术已经逐渐发展为获取大面积连续覆盖地表形变场的主要手段.在各大类形变成因机制中,地震地表形变场(尤其同震形变场)的获取成为 InSAR 技术应用最为成功的领域之一,一系列的大地震均获得了较好的 InSAR 形变同震图像^[2~5].与 InSAR 技术一道发展的,是对数据的反演方法与分析;经历从最初的均匀正演分析^[6,7]到均匀滑动反演^[8]再到滑动分布反演^[9~12]的过程.利用 InSAR 数据,或与其他地表形变数据(如 GPS、水准数据等)结合,甚至与地震波形数据联合反演一定断层模型下的滑动分布已成为人们理解地震发震机理及震源破裂过程的重要手段^[9].

2008 年 3 月 21 日新疆于田 $M_s 7.1$ 地震是自 2005 年以来发生于青藏高原的一系列正断层破裂中震级最强的一个(图 2),是青藏高原板块内部在重力作用下东西向扩张的结果之一^[13].研究这次较大规模的正断层地震及其同震断层滑动分布,不仅能在基于点源模型震源机制解的基础上进一步加深对此次地震发震机理和破裂样式的认识;同时,也能为精确的库仑破裂应力变化提供基础数据.如,由于缺少断层滑动分布数据,万永革等^[14]不得通过估算的均匀滑动量计算 2008 年于田地震所导致的周边断裂库仑应力变化.因而,本研究利用 ALOS PALSAR 数据获得的 InSAR 同震形变场反演了于田地震的断层滑动分布;同时研究了 InSAR 入射角与方位角对滑动分布反演结果的影响.这是由于 InSAR 观测到的是视线向形变量(Line Of Sight, LOS),与入射角和方位角随观测点的变化相关(图

1),但已有的研究中均未能考虑它们随点位变化对断层滑动分布反演的影响^[8,11].因而,我们构造了 4 类反演方案:(1)利用平均入射角与方位角进行反演,

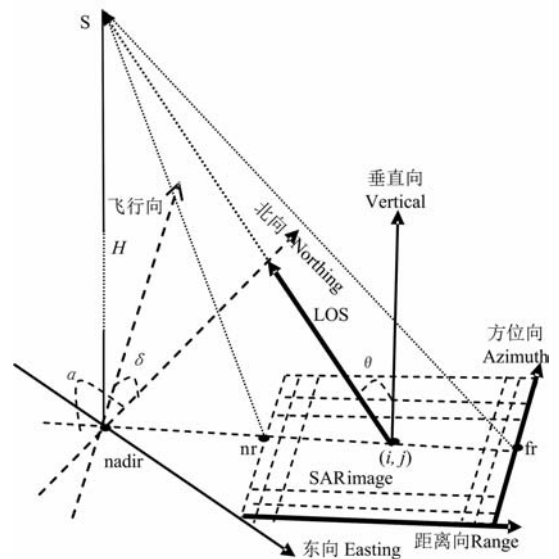


图 1 InSAR 入射角与方位角及其与视线向形变的几何关系立体示意图(升轨模式)

LOS 为视线向矢量,指向卫星为正; θ 为入射角,为垂直方向与 LOS 方向的夹角;飞行向为雷达卫星行进方向在地面的投影轨迹; δ 为卫星飞行方向与北向的夹角, α 规定为方位角,顺时针为正,对于升轨数据, α 等于 $\delta - 90^\circ$; H 为卫星平台高度;nadir 为卫星天底点;nr,fr 分别为最近、最远距离点; (i, j) 为 SAR 图像内任意一点.

Fig. 1 The schematic observation geometry of InSAR system between incidence angle and azimuth angle and line of satellite (ascending mode)

LOS means the vector between ground point to the satellite, Line Of Sight; θ is the local incidence angle. Flying direction means the projected line from the moving direction of the satellite on surface. δ is the angle between due north and satellite heading direction. α is defined as the azimuth angle, positive when clockwise. H denotes the height of the satellite platform. nr/fr are the nearest and farthest rang point on SAR image. (i, j) is a random point on an image.

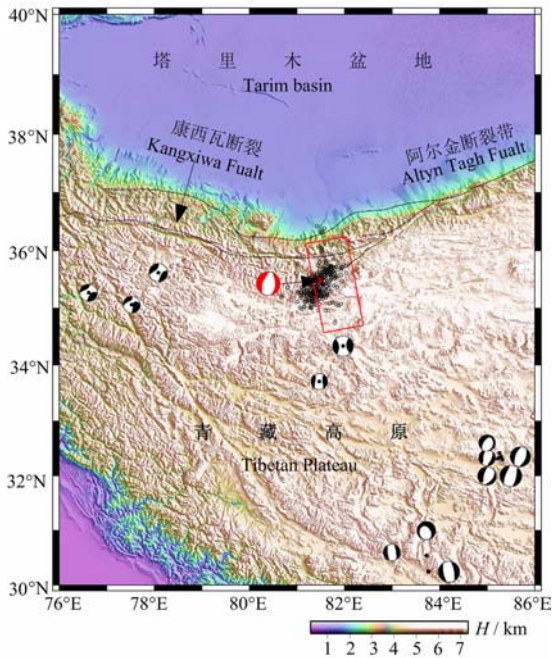


图 2 于田地震区域构造与地震活动性

黑色线条为区域断层分布;黑色沙滩球为 Harvard 的历史地震震源机制解;地形数据为 SRTM;黑色圆圈为 NEIC 震后 5 个月的余震分布;红色方框代表 InSAR 观测区域。

Fig. 2 Local faults and seismicity of the 2008 Yutian earthquake

Black lines are local faults; Focal mechanisms of historic events are from Harvard CMT solutions; Topography is from SRTM; Black circles is the aftershocks from NEIC; The red square denotes the InSAR observation area.

(2), (3) 入射角和方位角其中一个使用平均值而另一个则随实际观测点位变化的方案, (4) 使入射角和方位角均随观测点位变化, 从而比较分析了这两大参数对反演结果的影响, 并最终获得了于田地震的较佳滑动分布。

2 于田 $M_s7.1$ 地震 InSAR 同震形变场

2008 年 $M_s7.1$ 新疆于田地震发生于西昆仑地震带和阿尔金地震带的交汇区, 塔里木盆地的南部, 靠近西昆仑山区的边缘部分; 震中位置位于西昆仑山中的阿什库勒盆地, 距阿尔金断裂南缘约 50 km。

表 1 不同机构的震源及断层参数

Table 1 Catalogued seismic solutions for the source and fault plane of the Yutian earthquake

信息来源	纬度/(°N)	经度/(°E)	深度/km	震级	方位角/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	$M_0/(\times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m})$
Harvard CMT	35.43	81.37	12	$M_w7.1$	203	52	-74	5.4
USGS	35.398	81.396	14	$M_w7.2$	219	69	-68	8.3
本研究	—	—	—	$M_w7.0$	—	—	—	3.3

哈佛大学 CMT 与美国地质调查局 (USGS) 震源机制解均显示, 此次地震为略带走滑的正断层性质, 断层走向为近南北向 (表 1)。

由于地震发生于青藏高原, 人类活动影响较小, 且大气水汽干扰较小, 有利于 InSAR 技术的应用。采用 ALOS 卫星的 PALSAR T514A 轨道数据 (L 波段, 波长 23.6 cm), 基于常规两通加外部 DEM 的差分干涉 InSAR 数据处理方法获得了于田地震的同震形变场 (图 3(a, b)); 同时, 获得了去除地球曲率影响后的局地入射角 (Local incidence angle) 和方位角 (图 3(c, d))。由于 ALOS 采用升轨方式获取 PALSAR 数据, 因而 LOS 正值表示向西或抬升运动, 最大为 15 cm; 负值则为向东或沉降运动, 最大可达 -160 cm 左右。从形变场分析, 断层西盘 (或北西盘) 运动较为复杂, 靠近断层区域为东向或沉降运动, 而远离断层往西约 50 km 则为西向或抬升运动; 断层东盘 (或东南盘) 运动相对简单, 以东向或沉降运动为主。两盘相对运动的趋势大体与震源机制解揭示的正断层破裂相一致, 更多的运动细节可从将要反演的滑动分布进行分析。

对 InSAR 数据反演而言, 一个特殊的步骤是对形变场数据进行下采样。原因在于 InSAR 获得的形变场包含过多的数据点位, 用其全部参与反演不可行^[15]。于田地震的 InSAR 形变场包含近百万个数据点位, 本研究采用二叉树采样方案^[16], 同时对形变值、入射角和方位角进行下采样。我们将重点放在观测值变化梯度上, 设定采样的梯度变化阈值为 0.1, 即梯度变化大于 0.1 时进行二叉树划分, 而梯度变化小于 0.1 时则不进行划分, 且对划分出的小块内部数据进行平均计算, 以消除噪声的影响。最终参与反演的 InSAR 数据点数为 7660。

3 反演算法

对于线弹性位错理论^[17], 利用格林函数将模型矢量与观测数据建立关系如式 (1):

$$\mathbf{d} = \mathbf{S}(\mathbf{x})\mathbf{G}(\mathbf{m}) + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

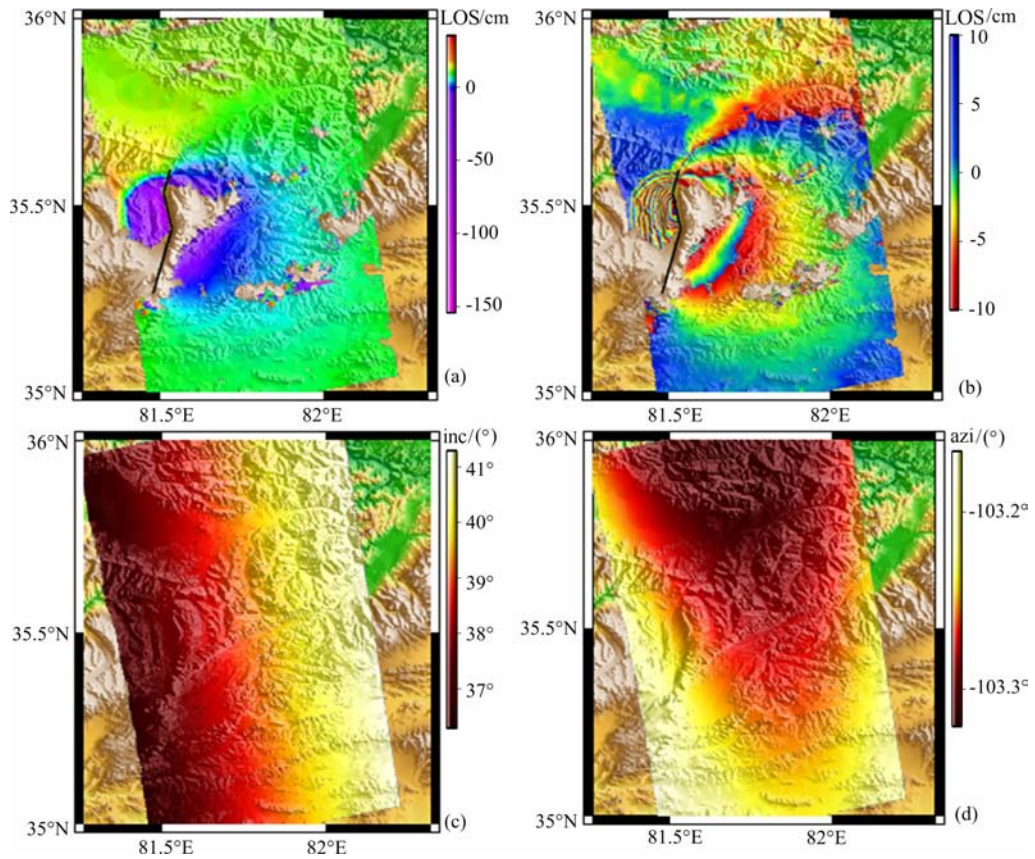


图3 于田地震 InSAR 视线向形变场和入射角、方位角的变化分布

- (a) 解缠后的于田地震 InSAR 同震形变场; (b) 重新缠绕后 InSAR 形变场; 其中黑色线条断层分段示意;
(c) 入射角在观测区域内的变化分布; (d) 方位角在观测区域内的变化分布。

Fig. 3 InSAR deformation of the Yutian Earthquake and the variation distribution of the incidence and azimuth angle

(a,b)The unwrapped and rewrapped InSAR deformation in LOS, respectively. Black lines denote fault segments.

(c,d)The variation distribution of incidence and azimuth.

d 为观测数据矩阵; x 为子断层块编号, m 为线弹性位错模型矢量, G 为将模型和观测数据联系起来的格林函数, ϵ 为观测误差, $S(x)$ 为滑动参数。

基于位错理论对形变数据的反演, 一般可归结为基于最大似然法则的线性最小二乘法求解问题^[12]. 本研究采用 Wang 等^[18] 的方法进行反演, 使得 K 个数据集的均方差函数最小:

$$f(s) = \sum_{k=0}^K \|d_k - d_k^0 - M_k S(x)\|^2 + \beta^2 \|HS(x)\|^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

d^0 为观测数据系统误差, M 为将模型与观测数据建立联系的格林函数, $\beta^2 \|HS(x)\|^2$ 为断层滑动光滑因子. 利用均方差函数作为模型拟合评价手段(代价函数, cost function), 模拟残差与断层光滑因子之间存在一种折中(tradeoff), 我们通过折中曲线确定的最终光滑因子为 0.25. 另外, 在反演过程对特定 InSAR 数据存在的观测系统误差(即 d_i^0) 进行了最小二乘估计并在反演过程加以校正(表2). 当我们

表2 反演中使用的断层模型参数

Table 2 Fault model parameters used in our inversion

断层编号	北东(西)	南西(东)	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	长度/ km	宽度/ km
	端点 经纬度/ $^{\circ}$	端点 经纬度/ $^{\circ}$				
F1	(81.54, 35.6)	(81.52, 35.54)	194	43	8	25
F2	(81.52, 35.54)	(81.55, 35.44)	168	60	12	20
F3	(81.55, 35.44)	(81.48, 35.26)	195	52	21	22

将入射角与方位角引入方程时, 则(2)式中的 d 可改写为:

$$d_{\text{LOS}} = \mathbf{a}d_{\text{U}}(i,j) + \mathbf{b}d_{\text{N}}(i,j) + \mathbf{c}d_{\text{E}}(i,j), \quad (3)$$

d_{LOS} 、 d_{U} 、 d_{N} 、 d_{E} 分别为 InSAR 视线向、垂直、北、东向观测分量任一位置 (i,j) 的形变数据; $(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})$ 为雷达视线向单位矢量, 由雷达入射角和方位角确定, 并与观测位置相关(图1), 其三角关系式为:

$$(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c})^{\text{T}} = (\cos\theta, -\sin\alpha\sin\theta, -\cos\alpha\sin\theta)^{\text{T}}. \quad (4)$$

举例来说, 如本研究使用的 ALOS 卫星 PALSAR T514A 雷达图像中心入射角 θ 与方位角

α 分别为 39.5° 、 -103.3° , 则 $(a, b, c)^T = (0.7716, 0.6190, 0.1463)^T$.

4 滑动反演结果及讨论

利用 9 个参数来描述断层位错模型,即断层的走向、倾角、滑动量、滑动角、起始点经度、纬度、长度、宽度、深度等. 由于同时反演这些参数是一个高度非线性的问题^[12],为使问题简单起见,断层模型采用 Elliott 等^[13]通过综合分析 ASTER 影像与 Envisat SAR 方位向偏移量(azimuth offsets)等确定的三段断层模型(表 3),并将它们沿走向与倾向均离散为 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ 的子断层,由此非线性问题转化为线性问题. 依据于田地震的正断层破裂机制,滑动角变化范围设定为 $220^\circ \sim 320^\circ$,以提高反演收敛效率. 最终我们将各个子断层内部的滑动角与滑动量作为反演目标,并着重分析入射角与方位角变化对滑动分布反演结果的影响.

对于前已述及的 4 类反演方案,所有的参数设置及断层模型均一致,仅改变观测数据中的入射角与方位角,获得的滑动分布结果如图 4,反演参数如表 3. 其中,图 4a 为使用平均入射角和方位角时获得的滑动分布;图 4b 为使用平均方位角和入射角随点位变化时获得的滑动分布;图 4c 为使用平均入射角

表 3 滑动分布反演参数

Table 3 Parameters of the four schemes of slip distribution inversion

反演方案	断层编号	平均滑动角/ $^\circ$	平均滑动量/m	InSAR 数据误差/cm	平均残差/cm	M_w
平均入射角与方位角	F1	262.60	0.46			
	F2	260.38	1.36	9.74	12.8	7.0
	F3	263.53	0.9			
平均方位角与变化入射角	F1	262.31	0.45			
	F2	260.05	1.34	9.67	12.5	7.0
	F3	264.40	1.09			
平均方位角与变化入射角	F1	262.61	0.46			
	F2	260.38	1.35	9.74	12.8	7.0
	F3	263.50	0.91			
变化入射角与变化方位角	F1	262.32	0.45			
	F2	260.05	1.34	9.67	12.5	7.0
	F3	264.37	1.1			

角和方位角随点位变化时获得的滑动分布;图 4d 为入射角与方位角同时随点位变化时的滑动分布. 从图 4 的滑动分布形态对比分析中可知,这 4 类方案之间具有较好的一致性,均在断层 2 和断层 3 上形成较大的滑动量,最高均可达 3.2 m,而在断层 1 处则滑动相对较小;滑动分布均主要集中于 $0 \sim 14\text{ km}$ 深度,未发现走滑断层类似的“浅部滑动缺失”(shallow

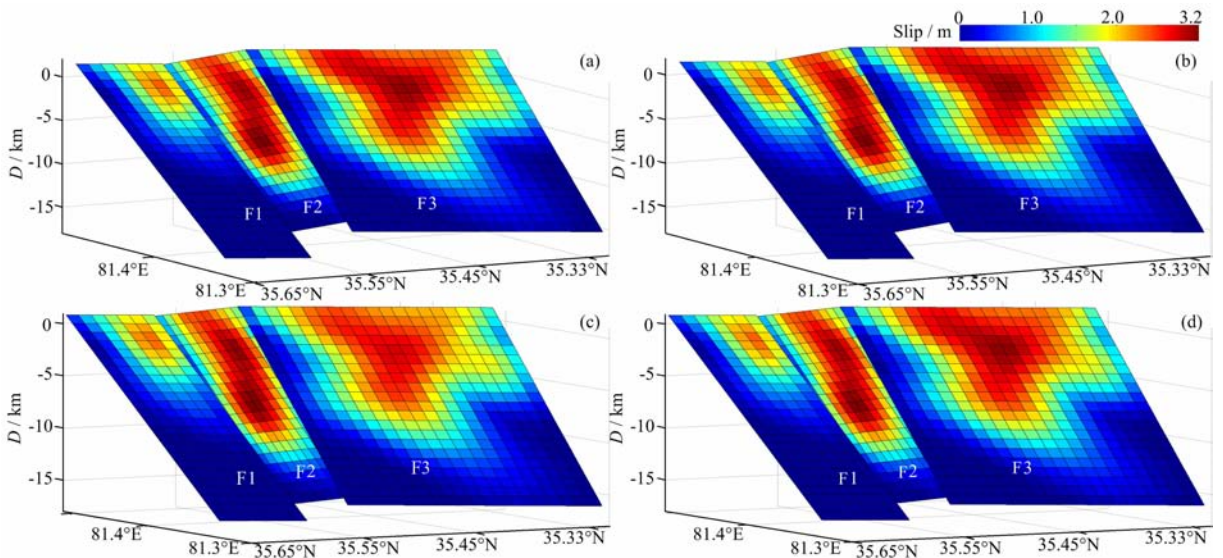


图 4 四类不同方案反演的断层面滑动分布

(a)平均入射角和方位角;(b)平均方位角,入射角随点位变化;(c)平均入射角,方位角随点位变化;(d)入射角与方位角同时随点位变化.

Fig. 4 The slip distributions from four schemes of inversion

(a)InSAR data using mean incidence angle and mean azimuth angle;(b)Location-dependant incidence angle and mean constant azimuth angle;(c) Location-dependant azimuth angle and mean constant incidence angle;(d) Location-dependant incidence angle and location-dependant azimuth angle.

slip deficit) 现象^[19]. 从差异最大的两类方案分析, 即使用平均入射角与平均方位角和入射角与方位角均随点位变化的反演方案之间, 模拟获得的形变场均与观测结果具有较好的拟合程度(图 5(a,c)), 数据拟合度分别高达 99.18% 和 99.25%; 两类方案间的反演残差也处于同一个水平, 平均残差分别为 12.8 cm 与 12.5 cm, 说明入射角与方位角的引入并不会显著降低残差(图 5(b,d)). 然而, 更多的滑动细节却在引入入射角与方位角之后得以展现. 首先, 在图 4a 和图 4b 之间, 即在引入入射角变化后, 断层 3 的滑动分布明显增大, 在深度 3~8 km 处滑动分布差异较大, 达 0.2 m; 说明与平均入射角相比, 入射角变化可能对反演结果产生较大影响. 其次, 在引入方位角变化后(图 4c), 同样的变化并未在断层 3 上出现, 图 4a 与图 4c 相当类似, 可以认为方位角变化对反演结果影响并不大; 一个原因是方位角在一幅图像内部变化极为有限, 通常不会超过 1°, 本研究采用的 InSAR 图像中方位角变化仅 0.2°. 最后, 同时引入入射角与方位角后, 获得的滑动分布与图 4b 较为类似(图 4d), 进一步证实入射角可能对反演结果影响较大, 而方位角的影响却并不明显.

分析产生此种差异可能的原因: 首先, 随着深度增加, InSAR 数据的反演结果不确定性增加; 但一般认为 30 km 深度以上的地壳厚度内介质弹性性质不会发生重大变化, 反演结果较为可信, 因而在断层模型及介质参数未发生重大变化的前提下, 这种差异不会出现. 其次, 断层附近区域 InSAR 数据的缺失导致反演出虚假的滑动分布^[6]; InSAR 形变场在 F2 的东盘附近及 F3 的西盘附近相关性过低, 形成数据空洞, 然而同样的情形却并未在断层 2 上出现, 因而此种可能性同样可以排除. 再次, 观测数据存在差异; 在引入入射角变化的反演结果中(图 4b、图 5(c,d)), 每个 InSAR 数据点位均采用不同的视线向单位矢量, 将是导致此种滑动分布差异的最大可能因素; 而方位角随点位变化的引入不能对反演结果产生重大影响, 因其在图像内部的变化几乎可以忽略.

从模拟结果与残差分析(图 5、表 3)可知, 入射角与方位角变化的引入并未能将数据拟合度提升一个等级. 4 类反演方案的残差均处于同一水平, 约 13 cm. 综合以往研究结果^[20], InSAR 反演残差水平更多的与 InSAR 观测误差(如大气水平干扰、震后形变量等)和断层几何模型相关. Elliott 等^[13] 利用 2 轨 Envisat 卫星 C 波段(波长约 5.6 cm) ASAR 数据

和 ALOS 卫星 L 波段 PALSAR 数据对于田地震进行了联合反演, 我们采用了与其相同的断层几何模型, 而他们的 ALOS PALSAR 数据残差最高达 30 cm, 在断层西盘并靠近断层附近有三个条纹未能模拟出来; 相比之下我们的整体残差水平较低, 仅有相当于一个左右的观测条纹残差值. 分析其中存在差异的主要原因有以下三点: 首先, 他们采用了不同波段和不同观测模式(升、降轨)的 InSAR 数据, 数据残差必将有所升高; 其次, 由于 InSAR 数据存在大气水汽干扰, 而 C 波段与 L 波段受大气水汽的扰动水平并不一致; 最后, C 波段与 L 波段的数据精度也不一致, 使得它们对反演的权重贡献也难以确定, 从而影响最终的反演残差水平.

对于反演结果的不确定性, 可从以下两方面加以分析.

首先是反演获得的地震矩张量解的不确定性. 我们构造的 4 类反演方案平均矩张量为 $3.24 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 而在引入入射角与方位角变化后反演获得的矩张量为 $3.3 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 与哈佛大学的矩张量解较为接近($5.4 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$), 但仅为 UGGS 反演结果的 40% (表 1). 假定剪切模量为 $3.3 \times 10^{10} \text{ Pa}$, 计算 InSAR 反演获得的于田地震矩震级达 $M_w 7.0$, 小于哈佛大学的 $M_w 7.1$ 与 UGGS 的 $M_w 7.2$. 在综合了 3 个轨道的 InSAR 数据后, Elliott 等^[13] 获得的矩张量解为 $5.4 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 同样小于 USGS 的反演结果, 与哈佛大学的矩张量解一致. 总体而言, 我们估算的矩张量小于已有的研究成果, 分析其中的主要原因是, 在断层附近区域由于形变梯度较大而使得雷达数据失相干, 从而造成 InSAR 形变场数据缺失, 尤其在断层东盘及断层西盘的南段(图 3(a,b)). 值得一提的是, 在对比分析 InSAR 数据所估算的矩张量和地震波反演的矩张量时, 必须给予足够的谨慎. 原因在于以下几点: (1) 矩张量的估算需精确估计滑动分布的面积, 不同数据集的反演能力及精度并不一致, 因而反演结果将存在一定偏差; (2) InSAR 数据获得的是地震造成的最终静态形变, 可能包含部分触发形变和震后滑动, 使得所估算的矩张量并不完全是同震时产生的矩张量; (3) InSAR 形变场断层近场数据的缺失, 导致部分矩张量不能通过 InSAR 数据滑动分布反演获得.

其次是不同的子断层单元离散尺度对反演结果也有一定影响. 综合考虑于田地震的矩张量大小、破裂长度和深度及反演效率等, 本研究采用了一个比较小的子断层单元尺寸, 沿走向与倾向方向均为

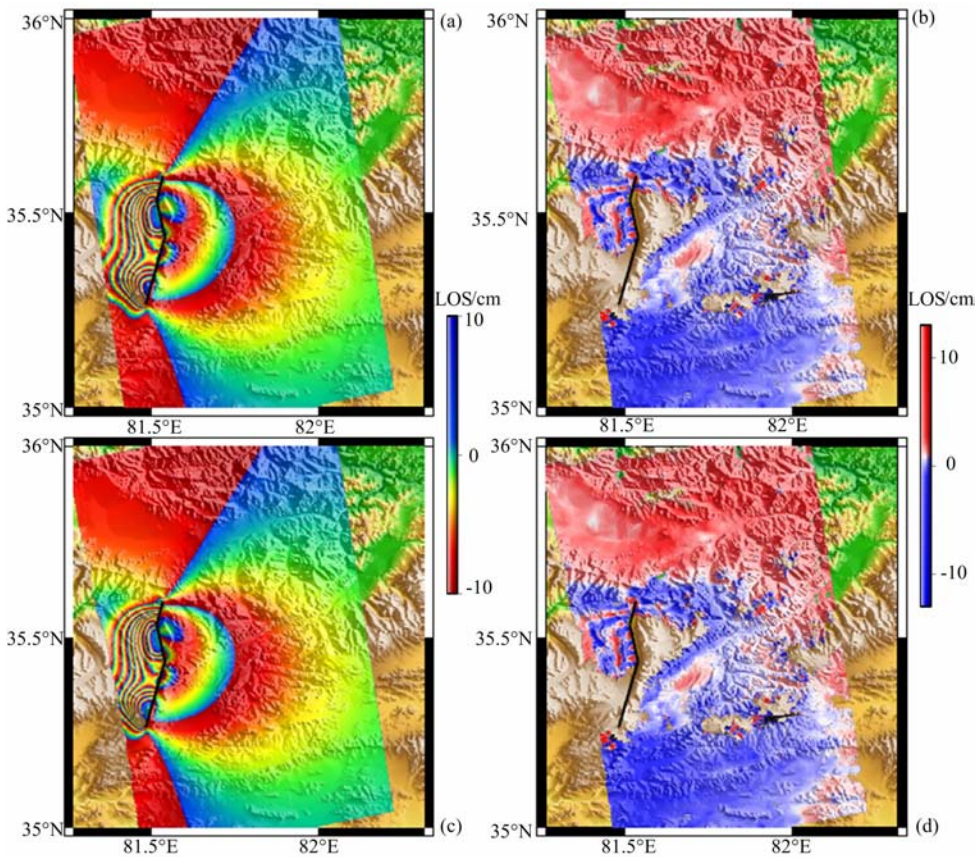


图 5 模拟的 InSAR 形变场及其残差

(a,b)平均入射角与平均方位角,黑色线条表示断层模型;(c,d)入射角与方位角均随点位变化(a,c)InSAR形变场;(b,d)残差。(a,c)颜色标尺一致,(b,d)颜色标尺亦一致。

Fig. 5 The simulated InSAR interferograms and its residuals

(a,b) are the modeled InSAR deformation and its residual, respectively, from the inversion of using mean incidence and mean azimuth angle. (c,d) are the modeled InSAR interferogram and its residual from inversion of using location-dependant incidence and azimuth angles, respectively.

1 km;而一般采用的子断层尺寸为 4 km 左右^[9,21]。通过测试不同尺寸的子断层单元我们发现,若子断层块小于 1 km,反演结果虽更为光滑,然而却使得反演效率急速降低,难以收敛;若子断层块大于 4 km则导致子断层之间的滑动跳跃过大,可能与实际滑动分布相差较大。当断层离散化单元位于 1 km 与 4 km,反演结果亦存在一定的差异,但断层滑动的整体空间分布趋势及矩张量、矩震级等震源参数反演结果均处于同一量级。

5 结论

本研究利用 InSAR 数据反演了 2008 年于田地震的滑动分布,通过对 InSAR 观测系统中两个重要参数,即入射角与方位角进行反演测试,分析了此两大参数对反演结果的影响,从而确定对它们的平均简化处理是否恰当,并最终获得了较佳的于田地震同震滑动分布。结论如下:

(1)由于入射角在图像内部变化较大,一般会有 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的改变,对于宽幅 SAR 数据甚至会更大,因而采用平均值进行反演将使结果更平滑;通过本文的研究我们证实,运用随点位变化的入射角将能获得断面滑动分布的更多破裂细节。换言之,对入射角进行平均处理进行分析与反演,将散失部分破裂细节。

(2)方位角变化对滑动分布反演的影响甚小,采用平均值是一种较好的选择。一方面,由于图像内部的方位角变化并不大;另一方面,由方程(4)可知,方位角在视线向形变量分解中的贡献也不如入射角大,方位角的三角函数是入射角的二阶参量。

(3)引入入射角与方位角变化后反演获得了较佳的于田地震滑动分布,在断层 2 和断层 3 上形成较大的滑动分布集中区,最大滑动量达 3.2 m,而在断层 1 处则滑动相对较小。我们的反演结果并未出现与走滑断层类似的“浅部滑动缺失”现象,滑动主要集中于 0~14 km 深度。

(4)反演获得的较佳矩张量为 $3.3 \times 10^{19} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级达 $M_w 7.0$.

致谢 文中图片绘制使用了 GMT 4.3 (Generic Mapping Tools) 绘制.

参考文献 (References)

- [1] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*, 1993, **364**(6433): 138~142
- [2] Feigl K L, Sarti F, Vadon H, et al. Estimating slip distribution for the Izmit mainshock from coseismic GPS, ERS-1, RADARSAT, and SPOT measurements. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(1): 138~160, doi: 10.1785/0120000830
- [3] Lasserre G C, Peltzer F, Crampé, et al. Coseismic deformation of the 2001 $M_w 7.8$ Kokoxili Earthquake in Tibet, measured by synthetic aperture radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**: B12408, doi: 10.1029/2004JB003500
- [4] Funning G J, Parsons B, Wright T J. Fault slip in the 1997 Manji, Tibet earthquake from linear elastic modelling of InSAR displacements. *Geophys. J. Int.*, 2007, **169**(3): 988~1008
- [5] Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geoscience*, 2009, **2**(10): 718~724, doi: 10.1038/nego636
- [6] Feigl K L, Dupre E. RINGCHN: a program to calculate displacement components from dislocations in an elastic half-space with applications for modeling geodetic measurements of crustal deformation. *Computers and Geosciences*, 1999, **25**(6): 695~704
- [7] 马超, 单新建. 昆仑山 $M_s 8.1$ 地震震源参数的多破裂段模拟研究. *地球物理学报*, 2006, **49**(2): 428~437
Ma C, Shan X J. A multi-segment analytic modeling of hypocentral geometric characteristic parameters of the $M_s 8.1$ earthquake at the Kunlun Mountains. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, **49**(2): 428~437
- [8] 孙建宝, 徐锡伟, 沈正康等. 基于线弹性位错模型及干涉雷达同震形变场反演 1997 年玛尼 $M_w 7.5$ 级地震参数—I. 均匀滑动反演. *地球物理学报*, 2007, **50**(4): 1097~1110
Sun J B, Xu X W, Shen Z K, et al. Parameter inversion of the 1997 Mani earthquake from INSAR co-seismic deformation field based on linear elastic dislocation model-I. Uniform slip inversion. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(4): 1097~1110
- [9] Delouis B, Giardini D, Lundgren P, et al. Joint inversion of InSAR, GPS, teleseismic, and strong-motion data for the spatial and temporal distribution of earthquake slip: Application to the 1999 Izmit Mainshock. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(1): 278~299, doi: 10.1785/0120000806
- [10] Motagh M, Wang R J, Walter T R, et al. Coseismic slip model of the 2007 August Pisco earthquake (Peru) as constrained by Wide Swath radar observations. *Geophys. J. Int.*, 2008, **174**(3): 842~848
- [11] Steven N Ward, Gianlucar Valensise. Fault parameters and slip distribution of the 1915 Avezzano, Italy, earthquake derived from geodetic observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1989, **79**(3): 690~710
- [12] Fukahata Y, Wright T J. A non-linear geodetic data inversion using ABIC for slip distribution on a fault with an unknown dip angle. *Geophys. J. Int.*, 2008, **173**(2): 353~364, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03713.x
- [13] Elliott J R, Walters R J, England P C, et al. Extension on the Tibetan plateau; recent normal faulting measured by InSAR and body wave seismology. *Geophysical J. Int.*, 2010, **183**(2): 503~535 doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04754
- [14] 万永革, 沈正康, 盛书中等. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释. *地球物理学报*, 2010, **53**(2): 280~289, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.006
Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. The mechanical effects of the 2008 $M_s 7.3$ Yutian, Xinjiang earthquake on the neighboring faults and its tectonic origin of normal faulting mechanism. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(2): 280~289, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.006
- [15] Lohman R B, Simons M. Some thoughts on the use of InSAR data to constrain models of surface deformation: Noise structure and data downsampling. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2005, **6**: Q01007, doi: 10.1029/2004GC000841
- [16] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault slip distribution of the 1999 $M_w 7.1$ Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, **92**(4): 1377~1389
- [17] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1992, **82**(2): 1018~1040
- [18] Wang R, Motagh M, Walter T R. Inversion of slip distribution from co-seismic deformation data by a sensitivity-based iterative fitting (SBIF) method. EGU General Assembly 2008, 2008, 10, EGU2008-A-07971
- [19] Simons M, Fialko Y, Rivera L. Coseismic deformation from the 1999 $M_w 7.1$ Hector Mine, California, Earthquake as inferred from InSAR and GPS observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, **92**(4): 1390~1402, doi: 10.1785/01200000933
- [20] 张国宏, 屈春燕, 宋小刚等. 基于 InSAR 同震形变场反演汶川 $M_w 7.9$ 地震断层滑动分布. *地球物理学报*, 2010, **53**(2): 269~279, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.005
Zhang G H, Qu C Y, Song X G, et al. Slip distribution and source parameters inverted from co-seismic deformation derived by InSAR technology of wenchuan $M_w 7.9$ earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(2): 269~279, DOI: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.005
- [21] Xu C J, Liu Y, Wen Y M, et al. Coseismic slip distribution of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake from joint inversion of GPS and InSAR Data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2010, **100**(5B): 2736~2749, doi: 10.1785/0120090253