

冯万鹏, 许力生, 李振洪. 2008 年 10 月当雄 $M_w6.3$ 级地震断层参数的 InSAR 反演及其构造意义. 地球物理学报, 2010, 53(5):1134~1142, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.014

Feng W P, Xu L S, Li Z H. Fault parameters of the October 2008 Damxung $M_w6.3$ earthquake from InSAR inversion and its tectonic implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(5):1134~1142, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.014

2008 年 10 月当雄 $M_w6.3$ 级地震断层参数的 InSAR 反演及其构造意义

冯万鹏¹, 许力生^{1*}, 李振洪²

¹ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

² Department of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

摘 要 2008 年 10 月 6 日在西藏当雄发生了 $M_w6.3$ 地震. 我们从一对降轨 ENVISAT ASAR 资料获得了这次地震的同震位移场, 通过同震位移场的反演确定了发震断层参数. 并且应用一维变异理论评估了 InSAR 结果中的误差协方差矩阵, 直接用于评价断层反演参数的不确定性水平. 结果表明, 此次地震发生于羊易盆地东缘的次级断层, 走向 178° , 倾角 58° , 倾向近正西, 以正断层运动为主, 兼具少量右旋走滑分量, 且资料的误差水平对反演结果的影响不大. 这次地震引起震中位置地表下沉至少 30 cm, 似乎是亚东—谷露裂谷带北段的羊易地堑下沉的表现.

关键词 当雄地震, InSAR 反演, 不确定性, 亚东—谷露裂谷带

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.05.014

中图分类号 P315

收稿日期 2009-12-16, 2010-03-05 收修定稿

Fault parameters of the October 2008 Damxung $M_w6.3$ earthquake from InSAR inversion and its tectonic implication

FENG Wan-Peng¹, XU Li-Sheng^{1*}, LI Zhen-Hong²

¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

² Department of Geographical and Earth Sciences, University of Glasgow, Glasgow G12 8QQ, United Kingdom

Abstract An $M_w6.3$ earthquake occurred in Damxung, Tibet, on October 6th, 2008. We determined the fault parameters using a descending coseismic interferogram from ENVISAT ASAR images. In addition, we examined the uncertainties in the InSAR-derived source parameters using the variance-covariance matrix of InSAR data points estimated with a 1-D semivariogram function. The inverted results showed that the earthquake occurred on a secondary fault in the eastern margin of the Yangyi basin, with a strike of 178° , a dip of 58° and dipping to west, which was normal faulting with a little of right-lateral strike slipping. It also appeared that the impact of the measurement errors on the uncertainties in InSAR derived source parameters was limited. This earthquake led to a subsidence of at least 30 cm at the epicenter, implying the Yangyi basin in the northern Yadong-Gulu Rift Belt was subsiding probably.

Keywords Damxung Earthquake, InSAR inversion, Uncertainty, Yadong-Gulu rift belt

基金项目 中国地震局地球物理研究所中央级基本科研业务专项(018903)和国家自然科学基金(40874026)资助.

作者简介 冯万鹏, 1979 年生, 助理研究员, 主要从事 InSAR 处理及地球物理反演研究. E-mail: fengwp@cea-igp.ac.cn

*** 通讯作者** 许力生, E-mail: xuls@cea-igp.ac.cn

1 引言

2008 年 10 月 6 日,位于西藏拉萨市西北约 73 km 的当雄县辖区内(29.8°N, 90.3°E, www.csi.ac.cn)发生了 $M_w6.3$ 级中强地震。此次地震至少造成 9 人死亡,14 人重伤,近 2000 户房屋破损,直接经济损失达 4.1 亿元人民币。该事件是继 1993 年尼木 $M_w6.3$ 地震以来(图 1,表 1),当雄地区活动最强烈、破坏最严重的地震事件。根据区域台网监测结果,震后短短一周内有千余次余震发生,沿北北西方向展布(www.csi.ac.cn)(图 1)。地震的宏观震中位于亚东—谷露裂谷带北段的羊易地堑附近^[1]。该地区长期受 EW 向拉张作用,1~2.5 Ma 以来在主边界断层东发育一系列次生正断层,在长期地质历史演化中逐渐形成多个断陷盆地,且盆中之盆、坎中之坎等地质现象也较为普遍^[2]。该地区地貌特征丰富,构造环境复杂,是我国地震活动最频繁的区域之一。

1411 年当雄南 $M_s8.0$ 地震^[3] 和 1952 年当雄北 $M_s7.5$ 地震^[4] 就是该区内 SN 向断层活动的产物。

吴中海等^[1] 在震后迅速展开现场考察,所得地裂缝、地震滑坡、崩塌等现场破坏特征与地震学测定结果基本吻合,等震线分布与中国地震局公布烈度分布趋势较为一致,长轴方向为北北东-北东向。这与余震的空间分布略有不同。结合区域活动构造特征,吴中海等^[1] 判定此次地震的发震构造为羊易盆地西缘主边界断裂,断层倾角在 66°~80° 之间,属正断层运动。

我们通过 InSAR 资料的分析和同震位移场的反演则认定,2008 年当雄 $M_w6.3$ 地震的发震构造位于羊易盆地的东缘断裂,是次级构造活动的产物。

2 InSAR 同震信息及误差特征

依托欧洲空间局(ESA)和中国科技部联合资助的“龙计划”国际合作项目,我们收集了覆盖此次地

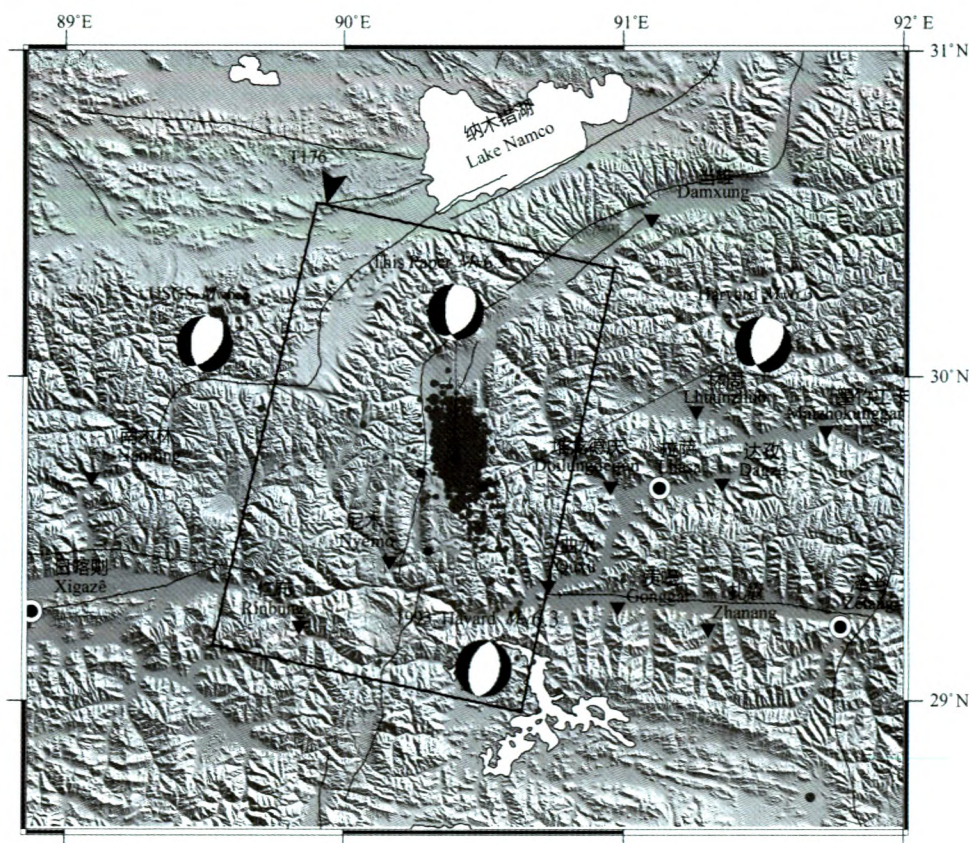


图 1 当雄地区构造背景场

灰色点为震后余震分布(www.csi.ac.cn),黑线为断层,黑线框为 ASAR 数据空间位置,倒三角为县城所在地。

Fig. 1 Topographic and tectonic background of the 2008 Damxung Earthquake

Gray dots represent aftershocks (www.csi.ac.cn), black lines indicate faults, black frame delimits the coverage of the ASAR images used in this study, and triangles mark the county towns.

表 1 2008 年 10 月 6 日当雄 $M_w6.3$ 地震震源机制

Table1 Focal mechanisms of the October 6th 2008 Damxung Earthquake

来源	位置		埋深/km	震源机制						震级
	Lon/(°E)	Lat/(°N)		Strike-1	Dip-1	Rake-1	Strike-2	Dip-2	Rake-2	
USGS ^a	90.274	29.704	10	180	48	-119	40	50	-60	6.3
Harvard ^b	90.5	29.66	12	178	53	-122	44	48	-55	6.3
InSAR ^c	90.3985	29.7503	8	178	58	-113	—	—	—	6.4

注:a, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008xva9/#> scitech, 2009 年 11 月查新; b, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>, 2009 年 11 月查新; c, InSAR 直接确定的震中位置为均匀滑动模型的矩形中心在地表投影。

震 13 景 ASAR 图像。由于当雄地震震中地区地形起伏在 4000~6000 m 之间, 高低错落, 沟谷纵横, 干涉像对的数据相干性较差。经比对筛选, 资料 20070415 和 20090419 两景图像所构成像对的相干性最佳(表 2), 因此, 用以获取此次地震的同震位移场。

2.1 同震位移场

我们应用加州理工大学(Caltech)/JPL 联合发布的开源 SAR 软件 ROI_PACv3.01^[5], 采取 2 次差分方案对上述两幅图像进行差分干涉处理, 以获取此次地震的同震位移场。由于干涉像对存在明显卫星轨道误差, 我们利用 2 次最佳拟合曲面的方法^[6]予以消弱。从图 2a 可以看出, 除西北方向部分地区未能完全解缠外, 整幅干涉图像相位连续, 条纹光滑清晰。形变区覆盖了整个羊易盆地, 呈 SN 向 25 km、EW 向 20 km 的椭圆状, 形变条纹以盆地东边缘为分界, 呈东西两瓣。西瓣形变较大, LOS 向最大位移量~0.3 m; 东瓣形变较小, 只出现一个色周变化, LOS 向最大位移量~0.06 m。同震形变主要集中在

表 2 ASAR 资料信息列表

Table 2 Details of the ASAR images used in this study

成像时间	轨道	模式	空间基线 ^a	LOS 向合成矢量 ^b	高度模糊度 ^c	相干性 ^d
20070415	26783	降轨	3.5	(0.4009,	9.8×10^{-4}	0.3
20090419	37304			-0.0816,		
				0.9125)		

注:a, 垂直空间基线; b, 地表 East、North 和 Up 三维形变量投影到 SAR 视线向(Light Of Sight, LOS)的系数矩阵(对应像对中心); c, 高度模糊度, 为 1 m 地形起伏在干涉图像中引起的位移场变化, 单位为 cm; d, 相干性(Coherence), 为整幅图像的平均值。

图 2a 虚线框部分, 所以, 这一区域的同震形变信息将被用于震源参数的反演。

2.2 误差特征分析

由于 DEM 误差、卫星轨道误差和大气噪声影响^[7], InSAR 干涉相位中存有一定的误差信息。DEM 误差与像对的基线相关, 垂直基线越长相位误差越大^[8]。文中所选像对垂直基线只有 3.5 m, 即

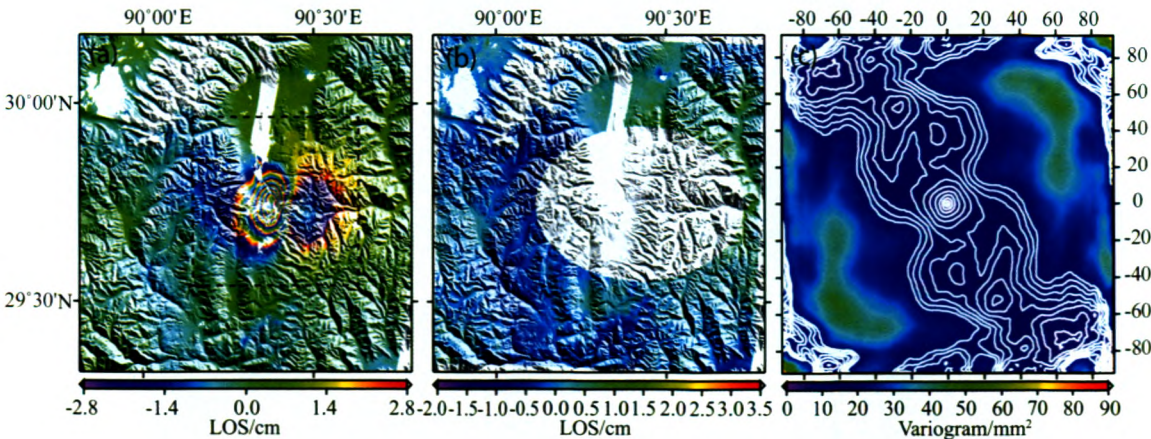


图 2 2008 年当雄地震降轨干涉同震位移场、远场噪声和二维噪声变异图像

(a)降轨 InSAR 同震位移场再缠绕结果, 虚线框范围内用于参数反演; (b)掩模掉形变场后的远场噪声分布;

(c)为(b)的经验变异函数图像, 横纵轴表示距离, 单位为 km。

Fig. 2 Descending interferogram of the coseismic deformation field, image of the far-field noise and the 2-D noise variogram for the 2008 Damxung Earthquake

(a) Rewrapped coseismic interferogram (descending). The dotted rectangle delimits where the InSAR data points were used for the inversion. (b) The far-field noise image after masking the coseismic signals. (c) The 2D variogram of Fig. (b). The units of x-axis and y-axis are km.

1 m 地形误差仅引入 $\sim 9.8 \times 10^{-4}$ cm 的形变误差. 对地形精度优于 10 m 的 SRTMv4.1 数据^[9]而言, 该误差忽略不计. 卫星轨道误差通常会造成波长变化, 远场曲面拟合的方法可以较好地解决该问题^[6, 10, 11]. 干涉像对中大气扰动的影响往往不能直接被忽略^[12].

大气扰动(尤其是大气水汽部分)的时空变化会直接引起模型参数的不确定性^[13]. 在没有额外水汽数据情况下^[14, 15], 直接使用 1D 或 2D 统计模型^[16, 17]来描述水汽噪声分布特征成为重要的技术手段. 在本研究中我们采用这种技术以削弱大气扰动的影响.

首先, 对干涉位移场中震中附近主要的形变区进行掩模处理, 只保留非形变信息的远场噪声. 如图 2b 所示, 噪声在 $-2 \sim 3.5$ cm 范围内摆动. 然后, 根据(1)式

$$2\gamma(x, y; h_x, h_y) = E(|f(x, y) - f(x + h_x, y + h_y)|^2), \quad (1)$$

结合 2D 快速傅里叶统计方法直接定量评价空间噪声的 2D 变异函数(Variogram)^[18]. 式(1)中, (x, y) 为空间任一点 p , $(x + h_x, y + h_y)$ 为 p 平移后的 p' 位置. 通过分析, 我们得到如图 2c 所示的 $|p - p'|^2$ 的统计信息. 从图中可以清楚地看出, 在沿横轴和纵轴方向 $0 \sim 80$ km 范围内图像基本由暗红渐变成蓝色, 全局最大的变异函数值为 90 mm^2 , 20 km 以外才出现较明显的色调抖动. $0 \sim 20$ km 的范围内, 等值线近圆形分布, 平均变异函数值为 $\sim 25 \text{ mm}^2$. 由此看来, 用于反演的资料范围内的大气扰动可以被视为各向同性.

2.3 大气噪声的解析描述

在各向同性的噪声场中, 任意点对之间的方差可以方便地使用与距离 h ($h > 0$) 相关的理论模型加以描述^[19]. 如上文所述, 我们选用的干涉图像中的大气噪声分布呈各向同性特征, 因此, 可采用如式(2)描述的 1D 变协方差函数替代经验统计^[20].

$$C_{kl}(h) = \sigma^2 e^{-\frac{h}{a}} J_0\left(\frac{2\pi h}{b}\right), \quad (2)$$

式中, $C_{kl}(h)$ 表示干涉像对中第 k 和第 l 个点的噪声方差; h 为两点的距离(km, $h > 0$); σ^2 为标准方差; a 和 b 为调整理论变差与统计变差间相似度的参数; J_0 为零阶贝塞尔函数.

将如图 2b 所示的协方差统计数据作为 $C_{kl}(h)$ 的观测值, 通过使用混合颗粒群非线性算法^[21]拟合观测值, 使二者的相关性达 0.99, 由此确定的最优

模型参数: $\sigma^2 = 68$, $a = 19.6$, $b = 1000$. 因此, 我们要采用的大气噪声的解析描述或协方差函数被确定为

$$C_{kl}(h) = 68 e^{-\frac{h}{19.6}} J_0\left(\frac{2\pi h}{1000}\right). \quad (3)$$

3 震源参数反演

3.1 单一均匀断层模型

根据同震位移场的干涉条纹的分布特征可以初步认定发震断层的滑动分布较为简单, 因此, 我们采用均匀采样法^[22]降分辨率提取观测信息. 在如图 2a 所示的框区内最终获取了 966 个观测点值. 由于发震断层没有明显的地表出露, 断层位置(Lon, Lat)、断层埋深(Depth)、断层宽(Width)、断层长(Length)、走向(Strike)、倾角(Dip)等 7 个非线性参数和滑动矢量的 2 个分量参数同时成为反演求解的对象. 为此, 构建如下目标函数:

$$\Omega = \| \mathbf{W}(\mathbf{d} - \mathbf{G}(\mathbf{G}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{d}) \|_{L_2}, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{G}$ 为根据弹性半空间位错理论^[23]计算的格林函数, $\mathbf{d}$ 为观测数据, $\mathbf{W}$ 为观测资料的权阵, 由 $\mathbf{W}^T \mathbf{W} = \mathbf{C}^{-1}$ 直接确定^[24], $\mathbf{C}$ 为观测数据的协方差矩阵. 在噪声可以忽略不计的情况下, 可将相等的权重赋予所有观测值, 因此, $\mathbf{C}$ 通常可取为单位矩阵^[25, 26]. 如果观测资料中存在不可忽视的非均匀扰动, 而继续使用相等的权重, 则反演结果会出现不可忽视的偏差. 从下面噪声或不确定性实验可以看出, 我们选用 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{kl}$, 反演结果会更好. 同上, 我们仍采用颗粒群优化算法^[21, 27]求解式(4)描述的非线性系统.

我们仿照 Parsons 等^[28]采用的蒙特卡罗方法, 首先基于协方差矩阵模拟 100 组大气噪声, 并添加给观测资料 $\mathbf{d}$, 形成 100 组融有大气扰动的观测数据集 d_p ($p = \{1, \dots, 100\}$), 然后由 d_p 反演确定 100 组模型参数. 同时, 为了说明 $\mathbf{C} = \mathbf{C}_{kl}$ 的加权方式更好, 我们分别在单位阵(Model1)加权和协方差矩阵(Model2)加权两种模式下进行了上述实验. 实验结果如图 3 所示. 可以清楚地看到, 蓝色点集(Model2 结果)更集中, 且其中心与由原始 InSAR 观测直接反演的结果几乎完全重合(参见表 3); 而灰色点集(Model1 结果)比较分散; 不过, Model1 结果中大多数参数在 95% 置信水平上的标准方差(ξ)变化也不大, 呈现出以中值(μ)为中心的高斯分布. 还可以看出, 滑动角与纬度、埋深与断层宽度、经度与宽度、经度与埋深之间出现一定的线性折中, 而其余任意二维参数之间的关系几乎是随机的(如图 3). 比较

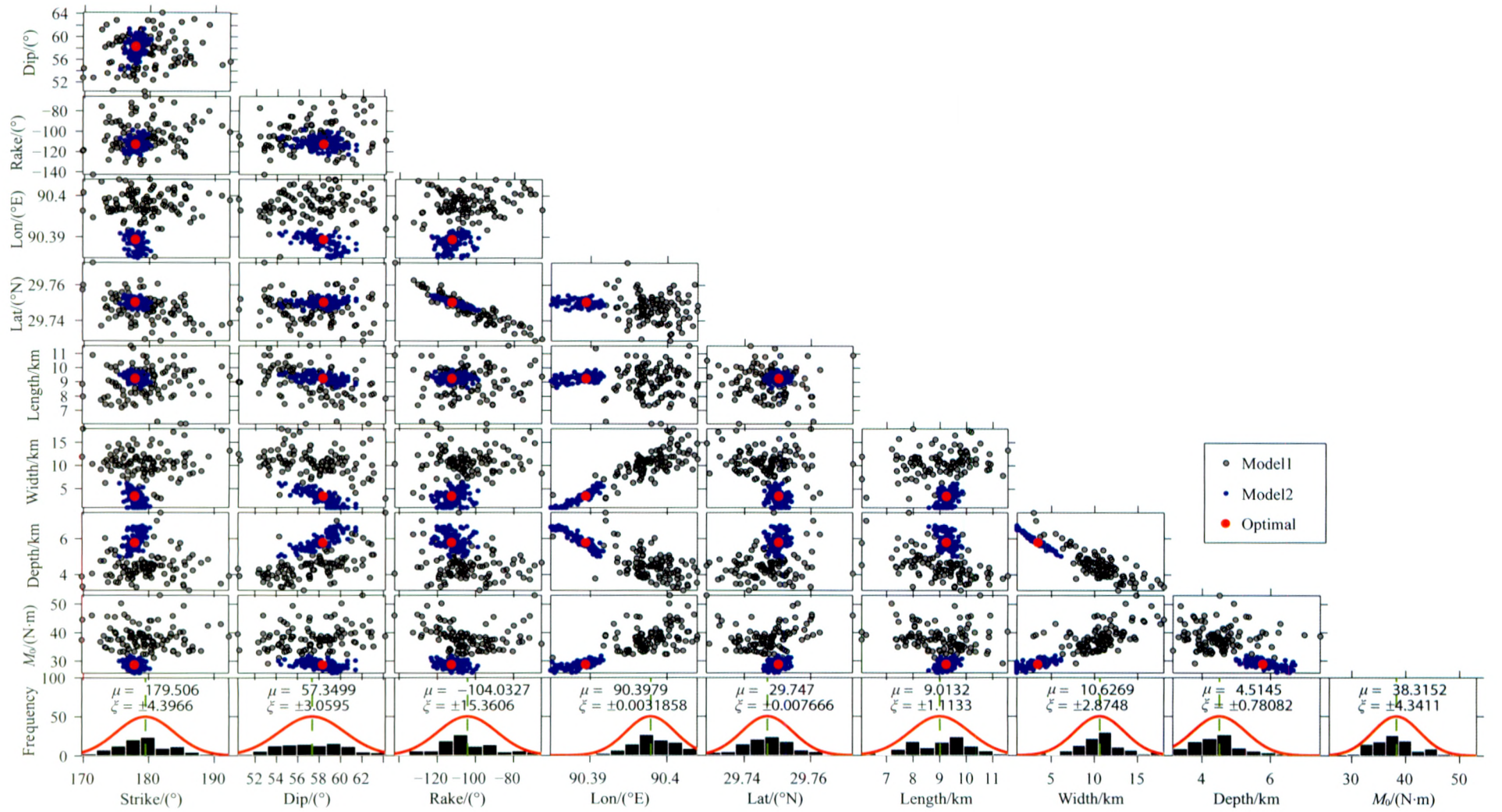


图 3 断层模型参数折中和不确定性分布图

灰色点和蓝点分别表示 Model1 和 Model2 模式对应的反演结果;红点为未添加模拟噪声并使用 $C_h(h)$ 加权情况下得到的结果; μ 为参数高斯分布的中值; ξ 为在 95% 置信水平下的标准偏差.

Fig. 3 Uncertainty and trade-offs of the model parameters

Gray points and blue points are the inversion results of Model1 and Model2, respectively; red dots are the ones inverted with the actual InSAR measurements weighted by $C_h(h)$. μ is the median value of the Gaussian distribution and ξ refers to the standard deviation at the level of 95% confidence.

表 3 基于 InSAR 反演获取的 2008 年当雄地震震源参数
Table 3 InSAR-derived source parameters for the 2008 Damxung Earthquake

	Model1	Model2	optimal	DSM	Harvard
Lon/(°E)	90.3979±0.0032	90.3886±0.0018	90.3894	90.3778 ^b	—
Lat/(°N)	29.7470±0.0073	29.7501±0.0018	29.7503	29.7502 ^b	—
Depth/km	4.5145±0.7808	5.9±0.4	5.8	0	12
Width/km	10.6±2.9	3.1±1.4	3.4	20	—
Length/km	9.0±1.1	9.2±0.2	9.2	18	—
Strike/(°)	179.5±4.4	177.9±0.9	177.8	177.8	178
Dip/(°)	57.3±3.1	58.23±1.5	58.3	55	53
Rake/(°)	-104.0±15.4	-112.0±5.2	-112.7	-124 ^c	-122
$M_0^2/(10^{17} \text{ N} \cdot \text{m})$	38.3±4.3	28.7±1.3	28.7	—	31.6
M_w	6.4	6.3	6.3	6.4	6.3

注:a,计算中涉及剪切模量 $\lambda=32.3 \text{ GPa}$;b,修正断层倾角为 55° 后的矩形中心所在位置;c,DSM 中滑动量大于 0.3 m 的单元平均滑动角。

Model1 和 Model2 两种模式下的反演结果与直接使用协方差函数加权 (Optimal) 情况下的反演结果 (表 3), 我们注意到, Model2 的反演结果与 Optimal 的结果更接近, 其中滑动角偏差最大, 但仅为 0.7° ; 而 Model1 的反演结果与 Optimal 的结果中偏差最大的为断层宽度, 偏差为 6 km 。由此看来, 资料中的大气扰动会给反演结果带来一定影响, 但是, 只要对这种扰动具有足够的认识, 并根据这种认识构建权重矩阵, 这种大气扰动的影响可以最小化。

3.3 滑动分布模型

为了反演断层面的非均匀滑动, 以 Optimal 情况下 (表 3) 反演得到的均匀模型为基础, 将断层面扩展到 $20 \text{ km} \times 18 \text{ km}$, 延伸到地表, 并划分成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的离散网格, 形成滑动分布断层模型 (Distributed Slip Model, DSM)。空间滑动与 InSAR 观测之间为线性关系。考虑先验光滑约束和矩阵 W , 我们构建出如下线性方程:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{G}_s & \mathbf{W}\mathbf{G}_d \\ \kappa^2 L & 0 \\ 0 & \kappa^2 L \end{bmatrix} \mathbf{m} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{d} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $\mathbf{G}_s$ 和 $\mathbf{G}_d$ 分别为 DSM 单位走滑和倾滑分量形成的地表三维扰动在卫星视线向投影的合成矩阵; $\mathbf{d}$ 为 LOS 向 InSAR 观测数据; L 为用于先验光滑约束的拉普拉斯方程^[29]; κ^2 为调整模型粗糙度的非负因子, 本研究中 $\kappa^2=2.2$; $\mathbf{m}$ 为待求的走滑和倾滑分量构成的矢量。

已有的研究表明, 均匀断层模型的倾角不等于 DSM 的倾角^[22, 30]。因此, 我们首先使用网格迭代法^[22]修订断层倾角, 然后反演空间滑动分布 $\mathbf{m}$ 。修订后的断层倾角为 55° , 反演得到的空间滑动分布

如图 4d 所示。DSM 反演结果显示, 该事件的滑动在空间上存在 2 个独立部分, 主要滑动分布在沿倾向方向 $6 \sim 14 \text{ km}$ 范围, 最大滑动约 2 m , 平均滑动角为 -124° ; 断面右上 $2 \sim 5 \text{ km}$ 深度范围内还有最大滑动量为 0.4 m 的滑动区, 滑动以右旋为主。

为了检验结果的稳定性, 我们应用前文所述 d_p 数据集分别获取 100 组空间滑动模型, 以讨论 DSM 的不确定性^[31]。由图 4e 和图 4f 可知, DSM 在走向方向上的最大不确定性水平 $\sim 0.2 \text{ m}$, 位于沿倾向方向 $12 \sim 16 \text{ km}$ 范围, 平均不确定水平 $\sim 0.08 \text{ m}$; 倾向滑动的最大不确定性不足 0.15 m , 且分布于沿倾向方向上 $10 \sim 16 \text{ km}$ 范围内。可见, 较大的不确定性只出现在较深的范围, 而主要滑动区域 ($6 \sim 10 \text{ km}$) 的不确定性水平仅 $\sim 0.1 \text{ m}$, 仅为最大滑动量的 5% 。这表明 DSM 反演结果具有相当的稳定性与可靠性。同时还表明, 资料对倾向滑动的约束优于走向滑动。这可能是地表南北形变量在 SAR 卫星 LOS 向投影有限所致 (参见表 2 中合成矢量)。从图 4c 可知, 由最终确定的 DSM 参数模拟得到的 InSAR 结果与观测值之间的残差均值仅为 0.3 cm , 最大残差仅为 0.8 cm 。最大残差出现在断层与地表交界位置, 此处残差很可能与地震造成的滑坡、塌陷^[1]等非弹性形变相关。

4 2008 年当雄 $M_w 6.3$ 级发震构造

藏南地区广泛分布的近南北向裂谷带 (包括亚东—谷露裂谷带) 是第三纪以来青藏高原区发生强烈东西向扩张的有力证据^[2, 32], 后期沿主边界正断层以东一系列快速断陷活动逐渐造就了现今当

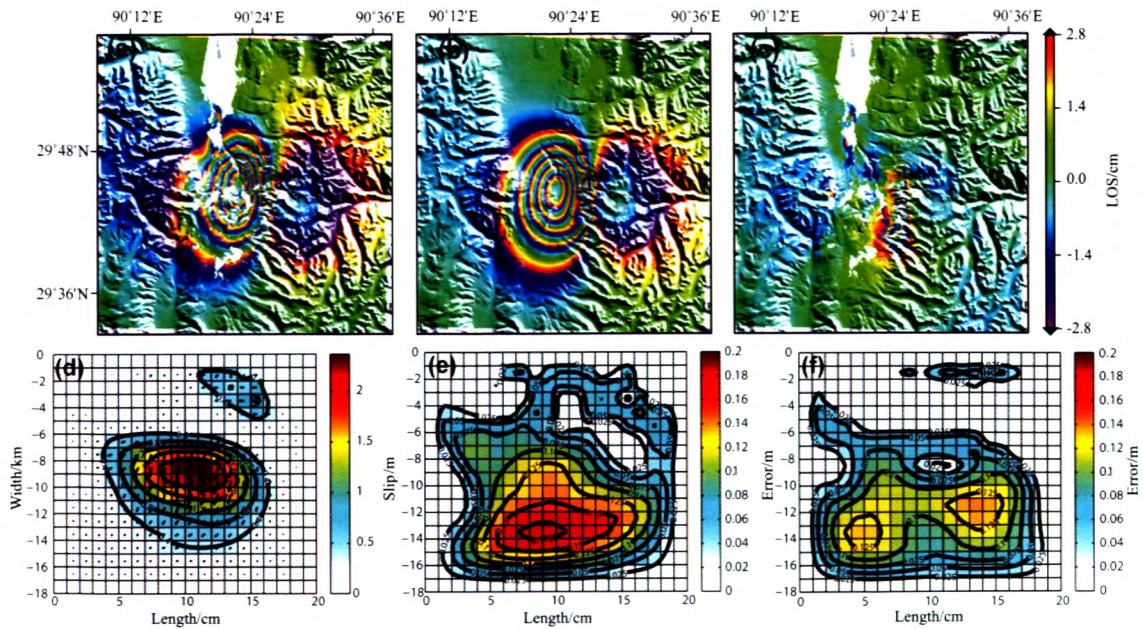


图4 InSAR 观测、滑动分布模型及不确定性

(a) InSAR 同震位移场; (b) 模拟 InSAR 位移场; (c) 观测位移与预测位移之间的残差; (d) 空间滑动分布, 黑色箭头表示滑动方向;

(e) 走向方向上滑动量的不确定性; (f) 倾向方向上滑动量不确定性。

Fig. 4 InSAR observations, distributed-slip model and slip uncertainty

(a) Observed coseismic interferogram; (b) Modeled coseismic displacement; (c) Residual interferogram ((a) - (b)); (d) Distributed-slip model, where the arrows indicate slip directions; (e) Uncertainties in the strike slips; (f) Uncertainties in the dip slips.

雄一带盆山交错的地貌特征^[33]. 由 ETM+ 资料 (www.landcover.org)、经 band7、4、2 假彩色合成影像可知, 在念青唐古拉山东麓出现多处的冲沟与水系扭曲样式非常一致, 并存在多次折曲现象, 由此可推断亚东—谷露断裂带当雄段在此曾经发生过左旋活动, 而且后来的某一时期又发生过右旋运动. 该构造是由于印度板块向欧亚板块俯冲, 以致青藏高原地壳缩短, 尔后夷平, 并在第四纪以来急剧隆起等一系列事件作用的结果^[34]. 这次当雄地震震中地区, 该断裂带控制着自南向北分布的安岗地堑 (Angang)、羊易地堑 (Yangyi) 和吉达果地堑 (Geda), 这些断陷盆地的西边界为主断层 WZBF (图 5). 在图像中还可以清晰识别出羊易盆地东缘分布着的梯状断层三角面和陡坎. 水系折曲等线性信息也较突出, 由此还可直接解译出两条近南北向展布的正断层 (EBF-I 和 EBF-II) (图 5). 对上述次级断层认识, 与早期应用地貌学分析的方法^[35] 和野外探勘所得结果相一致^[34].

我们将单一均匀断层模型 (白框) 和滑动分布模型 (黑色网格) 叠加于当地的地貌与构造背景 (图 5). 可以看出, 断面在地表的投影覆盖了几乎整个羊易盆地, 主要滑动区 (白框范围) 刚好位于盆地中心区内, 断层的地表出露线与 EBF-II 几乎重合, 与余

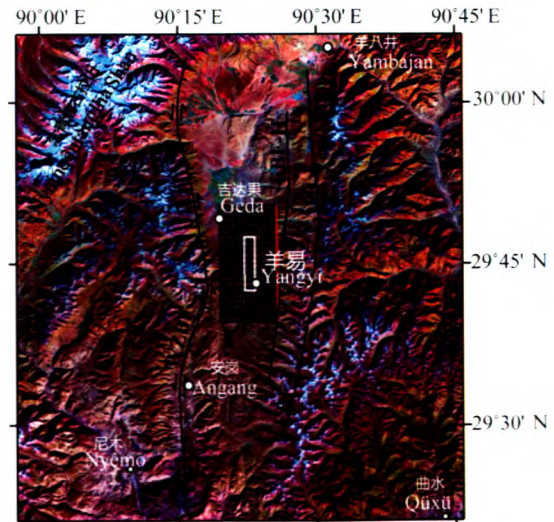


图5 2008 年当雄地震发震构造 ETM+ 解译图
白框为均匀断层模型在地表的投影; 黑线格为空间滑动分布模型在地表的投影; 红线为空间滑动模型与地表的交线。

Fig. 5 The ETM+ image of the seismogenic structure of the 2008 Damxung Earthquake

The white rectangle indicates the uniform model projected on the ground surface; the black net indicates the DSM projected on ground surface; the red line represents the intersection of the DSM with the ground surface.

震的空间分布具有很好的一致性 (图 1). 考虑到利用 InSAR 资料直接确定的发震断层的走向和倾角

的不确定性仅 4° 左右、定位精度在亚公里水平(参见图 3 和表 3)、用 InSAR 资料确定的震中位置距 WZBF 断层近 20 km 以及 WZBF 断层为东倾正断层^[36]等信息,我们认为这次当雄地震的发震构造为 EBF-II 断层,而不是吴中海等^[1]判定的羊易盆地西缘主边界断裂 WZBF。

5 结 论

2008 年 10 月 6 日西藏当雄 $M_w 6.3$ 地震的发震断层是位于羊易盆地东缘的次生断层,走向 178° ,倾角 55° ,倾向近正西,以正断层运动为主,兼具少量右旋走滑分量。尽管 InSAR 结果中仍然分布一定水平的误差,但应用蒙特卡罗方法分析结果表明,该误差对结果的影响有限,反演确定的发震断层的模型参数非常稳定。同时,InSAR 资料反演模型与 ETM+遥感影像解译结果相吻合,说明反演结果的可靠性。这次地震引起羊易盆地下沉约 30 cm,似乎是亚东—谷露裂谷带北段的羊易地堑下沉的表现。

基于各向同性变异理论对本文 InSAR 资料中误差统计分析可以较好描述误差分布特征。显然,由误差协方差矩阵约束下(Model2)的解的可信区间更小,且与等权重约束(Model1)结果存在一定偏差,充分显示了评价误差协方差矩阵的可靠性和必要性。数值实验表明,呈高斯分布的噪声会给反演结果带来一定的影响,但是,如果对噪声分布特征具有足够的认识,并根据此认识构建权重矩阵,这种影响几乎可以完全消除。

致 谢 感谢 Marcotte 教授关于快速傅里叶方法评价 2D 经验协方差图像的讨论;文中图 1,2,4(a~c),5 皆由 GMT4.5.1^[37]绘制而成。感谢两位匿名评审专家的宝贵意见,使得行文更加严谨和完整。文中所使用 ASAR 资料均由中国科技部和欧洲空间局联合资助的 Dragon-II 项目(ID:5305)提供。

参考文献(References)

- [1] 吴中海,叶培盛,吴珍汉. 2008 年 10 月 6 日西藏当雄 $M_s 6.6$ 级强震的地震烈度控震构造和发震机理. 地质通报, 2009, 28(6):713~725
Wu Z H, Ye P S, Wu Z H. The seismic intensity, seismogenic tectonics and mechanism of the $M_s 6.6$ Damxung earthquake happened on October 6, 2008 in southern Tibet, China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 2009, 28(6):713~725

- [2] 吴珍汉,胡道功,刘崎胜等. 西藏当雄地区构造地貌及形成演化过程. 地球学报, 2002, 23(5):423~428
Wu Z H, Hu D G, Liu Q S, et al. The formation and evolution of tectonic landform of Damxung area in central Tibetan Plateau. *Acta Geoscientia Sinica* (in Chinese), 2002, 23(5):423~428
- [3] 吴章明,曹忠权,申屠炳明等. 1411 年西藏当雄南 8 级地震发震构造. 中国地震, 1992, 8(2):46~52
Wu Z M, Cao Z Q, Shentu B M, et al. Seismogenic structure of the 1411 southern Damxung earthquake of $M=8$ in Tibet. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1992, 8(2):46~52
- [4] 吴章明,曹忠权. 1952 年西藏当雄 7.5 级地震烈度的再评定. 地球物理学报, 1991, 34(1):64~72
Wu Z M, Cao Z Q. Review on intensity of Damxung earthquake ($M_s=7.5$) in 1952, Tibet. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1991, 34(1):64~72
- [5] Rosen P A, Henley S, Peltzer G, et al. Updated repeat orbit interferometry package released. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 2004, 85(5), doi:10.1029/2004EO050004
- [6] Wright T J, Lu Z, Wicks C. Source model for the $M_w 6.7$, 23 October 2002, Nenana Mountain earthquake (Alaska) from InSAR. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, 30(18), doi:10.1029/2003GL018014
- [7] Li Z, Liu Y, Zhou X, et al. Using small baseline interferometric SAR to map nonlinear ground motion: a case study in northern Tibet. *Journal of Applied Geodesy*, 2009, 3:163~170, doi:10.1515/JAG.2009
- [8] 李振洪,刘经南,许才军. InSAR 数据处理中的误差分析. 武汉大学学报(自然科学版), 2004, 29(1):72~76
Li Z H, Liu J N, Xu C J. Error analysis in InSAR processing. *Geomatics and Information Science of Wuchan University* (in Chinese), 2004, 29(1):72~76
- [9] Farr T G, Caro E, Crippen R, et al. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 2007, 45, doi:10.1029/2005RG000183
- [10] Biggs J, Wright T, Lu Z, et al. Multi-interferogram method for measuring interseismic deformation: Denali Fault, Alaska. *Geophys. J. Int.*, 2007, 170:1165~1179, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03415.x
- [11] Wright T J, Parsons B, England P C, et al. InSAR observations of low slip rates on the major faults of western Tibet. *Science*, 2004, 305:236~239
- [12] Goldstein R. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophys. Res. Lett.*, 1995, 22(18):2517~2520
- [13] Dawson J, Tregoning P. Uncertainty analysis of earthquake source parameters determined from InSAR: a simulation study. *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, B09406, doi:10.1029/2007JB005209
- [14] Li Z, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, B02404, doi:10.1029/2005JB003711
- [15] Li Z, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric synthetic

- aperture radar atmospheric correlation: Medium Resolution Imaging Spectrometer and Advanced Synthetic Aperture Radar integration. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**, L06816, doi:10.1029/2005GL025299
- [16] Hanssen R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Acad., 2001
- [17] 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**, 12, Q01007, doi:10.1029/2004gc000841
- [18] Marcotte D. Fast variogram computation with FFT. *Computers & Geosciences*, 1996, **22**(10):1175~1186
- [19] Goovaerts P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. New York: Oxford Univ., 1997
- [20] Biggs J, Burgmann R, Freymueller J T, et al. The postseismic response to the 2002 M_w 7.9 Denali Fault earthquake: constraints from InSAR 2003~2005. *Geophys. J. Int.*, 2009, **176**:353~367, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03932.x
- [21] 冯万鹏, 李振洪. InSAR 资料约束下震源参数的 PSO 混合算法反演策略. 地球物理学进展, 已接受
Feng W P, Li Z H. A novel hybrid PSO/Simplex Algorithm for determining earthquake source parameters using InSAR observations. *Progress in Geophysics* (in Chinese), (Accepted)
- [22] 冯万鹏, 李振洪, 李春来. 利用 InSAR 确定 2009 年 4 月 6 日 M_w 6.3 拉奎拉 (Italy) 地震最优震源模型. 地球物理学进展, 已接受
Feng W P, Li Z H, Li C L. Optimal source parameters of the 6 April 2009 M_w 6.3 L'Aquila, Italy earthquake from InSAR observations. *Progress in Geophysics* (in Chinese), (Accepted)
- [23] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1985, **75**(4):1135~1154
- [24] Wright T J, Lu Z, Wicks C. Constraining the slip distribution and fault geometry of the M_w 7.9, November 2002, Denali Fault earthquake with Interferometric Synthetic Aperture Radar and Global Positioning System data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2004, **94**(6B):S175~S189
- [25] 孙建宝, 石耀霖, 沈正康等. 基于线弹性模型反演 1997 年西藏玛尼 M_w 7.5 级地震的干涉雷达同震形变场—I 均匀滑动反演. 地球物理学报, 2007, **50**(4):1097~1110
Sun J B, Shi Y L, 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
- [26] 冯万鹏, 许力生, 许忠淮等. 利用 InSAR 资料反演 2008 年西藏则则 M_w 6.4 和 M_w 5.9 地震的断层参数. 地球物理学报, 2009, **52**(4):983~993, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.015
Feng W P, Xu L S, Xu Z H, et al. Source parameters of the 2008 Gerze M_w 6.4 and M_w 5.9 earthquakes from InSAR measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(4):983~993, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.04.015
- [27] Li Z, Feng W, Xu Z, et al. The 1998 M_w 5.7 Zhangbei-Shangyi (China) earthquake revisited: a buried thrust fault revealed with interferometric synthetic aperture radar. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2008, **9**(4), Q04026, doi:10.1029/2007GC001910
- [28] Parsons B, Wright T, Powe P, et al. The 1994 Sefidabeh (eastern Iran) earthquakes revisited: new evidence from satellite radar interferometry and carbonate dating about the growth of an active fold above a blind thrust fault. *Geophys. J. Int.*, 2006, **164**:202~217
- [29] Jónsson 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. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(4):1377~1389
- [30] Burgmann R, Ayhan M E, Fielding E J, et al. Deformation during the 12 November 1999 Duzce, Turkey, earthquake, from GPS and InSAR data. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 2002, **92**(1):161~171
- [31] Funning G J, Parsons B, Wright T J. Surface displacements and source parameters of the 2003 Bam (Iran) earthquake from Envisat advanced synthetic aperture radar imagery. *J. Geophys. Res.*, 2005, **110**, B09406, doi:10.1029/2004JB003338
- [32] Yin A, Kapp P A, Murphy M A, et al. Significant Late Neogene east-west extension in northern Tibet. *Geology*, 1999, **27**(9):787~790
- [33] 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉等. 西藏当雄—羊八井盆地的第四纪地质与断裂活动研究. 地质力学学报, 2006, **12**(3):305~316
Wu Z H, Zhao X T, Wu Z H, et al. Quaternary geology and faulting in the Damxung-Yangbajing basin, southern Tibet. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2006, **12**(3):305~316
- [34] Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. Quaternary extension in southern Tibet: field observations and tectonic implications. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**(B14):13803~13872
- [35] Fielding E, Isacks B, Barazangi M, et al. How flat is Tibet? *Geology*, 1994, **22**(2):163~167, doi:10.1130/00917613(1994)
- [36] 邓启东, 张培震, 冉永康等. 中国活动构造基本特征. 中国科学(D辑), 2002, **32**(12):1020~1030
Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics in China. *Science in China (Series D-Earth Science)* (in Chinese), 2002, **32**(12):1020~1030
- [37] Wessel P, Smith W H F. New, improved version of generic mapping tools released. *EOS, Trans. Amer. Geophys. Union*, 1998, **79**(47):579