

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.0001-5733.2010.02.005

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.0001-5733.2010.02.005

基于 InSAR 同震形变场反演汶川 M_w 7.9 地震 断层滑动分布

张国宏¹, 屈春燕¹, 宋小刚¹, 汪驰升^{1,2}, 单新建¹, 胡植庆³

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 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

3 台湾大学地质科学系, 台北 10617

摘 要 通过综合分析 2008 年 5 月 12 日汶川地震野外地震地质考察的地表破裂带空间分布及分段资料, 结合 InSAR 干涉形变场资料, 构建了五段断层几何结构模型, 该模型与野外地震地质考察结果在多数分段上基本一致; 基于此五段断层模型, 运用敏感性迭代拟合算法反演了汶川地震 InSAR 同震形变场, 获得了断层滑动分布及部分震源参数. 结果表明, 基于余震精定位获得的地震断层倾角模型模拟的同震形变场与 InSAR 形变场吻合较好, 且残差较小; 反演的滑动分布主要集中于地下 0~20 km, 最大滑动量分别位于北川及青川等地区, 最大可达到 10 m; 沿 SW-NE 走向, 断层面的滑动方向主要以右旋兼逆冲形式为主, 在汶川及都江堰地区以强烈的逆冲为主兼有一定右旋走滑分量, 在北川及映秀地区以逆冲兼右旋运动为主, 在平武及青川等地区则逐渐过渡为以右旋运动为主兼有一定的逆冲分量, 其中汶川地区的平均滑动角为 97° , 北川地区的平均滑动角为 119° , 青川地区平均滑动角为 138° . 反演矩张量为 $7.7 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$, 矩震级达 M_w 7.9.

关键词 汶川地震, InSAR 同震形变场, 敏感性迭代拟合算法, 滑动分布反演, 震源参数

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.02.005

中图分类号 P228

收稿日期 2009-09-01, 2009-12-04 收修定稿

Slip distribution and source parameters inverted from co-seismic deformation derived by InSAR technology of Wenchuan M_w 7.9 earthquake

ZHANG Guo-Hong¹, QU Chun-Yan¹, SONG Xiao-Gang¹, WANG Chi-Sheng^{1,2},
SHAN Xin-Jian¹, Hu Jyr-Ching³

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

2 Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

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

Abstract We have established a five-segment fault model based on field investigation and the linear noncoherent characteristics of InSAR wrapped deformation. The five-segment fault model is consistent with the surface rupture trace of field investigation at most of the segments. Then we use this fault model as constraints to simulate the co-seismic deformation of Wenchuan earthquake derived from InSAR technology. Our favored fault model contains five segments with

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, 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

varied dips, based on the seismogenic structure of precise aftershock relocation. The simulated deformation by forward modeling matches very well the InSAR data with a RMS of 0.3~0.35 m. The inverted slip distribution is concentrated in the depth of 0~20 km and the maximum slip is 10m. Among the largest-slip areas Beichuan area has relatively more concentrated slip at shallower depth than other areas. This may be the deep cause why Beichuan area is the most severely destroyed area in this earthquake. The inverted rake distribution shows that there is a transition along the direction of SW-NE. It is mainly reverse and some right-lateral slip at Wenchuan and Beichuan areas, but it is dominantly right-lateral with some thrusting in Qingchuan area, with the mean rake of 97° and 138° respectively. The inverted seismic moment M_0 is 7.7×10^{20} N·m, and the moment magnitude M_w is 7.9.

Keywords Wenchuan earthquake, Co-seismic deformation derived from InSAR, Sensitive-based iterative fitting method, Inversion of slip distribution, Earthquake source parameters

1 引言

2008年5月12日四川汶川 $M_s 8.0$ 大地震是继2001年昆仑山口西 $M_s 8.1$ 地震以来21世纪发生在中国大陆内部的又一次8.0级以上强震,此次地震因其巨大的灾难性后果而引起世人广泛关注.汶川地震地质考察表明^[1],此次地震发生于四川盆地西北缘龙门山断裂带的映秀—北川断裂,它是龙门山断裂带的中央断裂,形成了一条长达230多公里的大断裂,是一次NE-SW走向并具有一定右旋分量的逆冲事件.汶川 $M_s 8.0$ 地震也是时隔75年来该断裂带再次发生的7级以上地震(1933年8月25日,叠溪 $M 7.5$ 级地震).从大的构造背景看,地震反映了印度板块相对欧亚板块以40~50 mm/a往北东方向汇聚^[2],导致中国大陆内部的川青块体向东缓慢运动,与坚硬的四川盆地碰撞而引发的构造应力作用结果.

近年来,利用地表形变数据(如GPS、InSAR等)单独反演或与地震波形数据一起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^[3~5],获得的断层非均匀滑动分布具有较高的空间分辨率,如Mahdi Motagh等^[6]利用宽幅InSAR形变数据反演了2007年秘鲁Pisco地震的滑动分布,相对利用地震波形记录反演所获得的结果而言,该滑动分布模型能显示更多的子断层破裂细节.汶川地震的时空破裂过程较为复杂^[7~9],尽管由地震波数据反演的断层面滑动分布具有较高的时间分辨率,如纪晨等于地震发生7h后便公布了基于单断层模型和远场地震波形记录的汶川地震震源破裂过程及断层面滑动

分布^[10],但更为精细的空间破裂分布可通过反演具有较高空间分辨率的地表形变数据来获得.因而,在获取了高精度的InSAR同震形变场后,一个更为紧迫的工作是反演断层非均匀滑动分布和震源参数,从而进一步加深对汶川地震发震机理和震源破裂过程的认识.

本研究首先通过综合分析野外地质考察所获得的断层地表分段模型、InSAR干涉形变场线性非相干性特征等建立了断层地表破裂几何结构模型;基于弹性半空间内^[11,12]和此有限断层分段模型,采用Wang等^[13]发展的基于敏感性迭代拟合方法(Sensitive-Based Iterative Fitting, SBIF)反演了已经获得的InSAR形变场数据,获得了断层面非均匀滑动分布及部分震源参数等.

2 汶川 $M_s 8.0$ 地震 InSAR 同震形变场

汶川地震发生后,利用远震波形记录,不同机构及研究者均反演了汶川地震震源机制解(表1).但不同的反演方法获得了不同的地震参数.美国国家地震信息中心(NEIC)采用P波初动解进行反演,其震中位置表示的是地震破裂起始点;而哈佛大学及陈运泰等采用的矩张量反演方法,震中位置表示矩心点,是破裂速率和能量释放最大的位置,因而其震中位置在NEIC给出的震中位置的北东向90~130 km.同时,反演获得的断层参数及滑动角也差异明显.其中,NEIC的P波初动解反演结果断层倾角最大,哈佛大学矩张量反演获得的倾角最小,二者相差达 26° ;而P波初动解反演的方位角也与矩张量反演结果不同.各反演结果的滑动角尽管均反映了逆冲为主且具有右旋分量的特性,但同样存在较

表 1 不同机构及研究学者的汶川地震震源机制解

Table 1 Catalogued and published seismic solutions for the mechanism of the Wenchuan earthquake

信息来源	纬度/(°)	经度/(°)	深度/km	震级	方位角/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	标量地震矩/($N \cdot m$)
NEIC	30.969	103.186	16	M_w 7.9	238	59	128	7.6×10^{20}
哈佛大学	31.49	104.11	12	M_w 7.9	229	33	141	9.43×10^{20}
陈运泰等 ^[7]	31.021	103.367	10	M_w 8.3	229	43	123	4.4×10^{21}

大差异. 结合震源破裂过程及地震地质考察等研究结果, 可以认为汶川地震是一次时空破裂过程变化、断层分段破裂且各段破裂机制均不一致的复杂事件.

由于震中区域地形复杂、植被覆盖较为密集, 通过采用日本 ALOS Pal-SAR L 波段雷达数据, 屈春燕等获得了汶川地震地表同震形变场^[14]. 图 1 清晰地反映出汶川地震地表同震形变场分布特征, 整个干涉条纹以北东向发震断层——映秀—北川断裂为中心分布, 干涉条纹呈包络发震断层分布. 整个同震形变场影响范围非常大, 长宽达到 $500 \text{ km} \times 450 \text{ km}$ 范围. 南侧影响到乐山、重庆一带, 北侧到南坪、武都、康县. 从干涉条纹的分布格局可以看出, 发震断层两侧干涉条纹有多次起伏, 且有一定的两盘不对称性, 这说明了位错量沿断层的不均匀分布. 在发震断层南西端点映秀镇附近, 出现了排列细密的同心干涉条纹, 说明这一带的形变强度非常大. 北川县城南东侧, 有平行于断层密集的干涉条纹包络, 表明该段发震断层有较大的地表位错量. 在汶川地震震中位置, 条纹开始包络震中, 表明震中附近是发震断层的西端点. 在青川附近, 条纹已包络了发震断层, 显示出断层东端点形成的形变场格局. 在发震断层附近, 断层两侧均表现为局部抬升, 且沿断层形变量分布很不均匀, 表现出较强的分段性, 显示出发震断层以逆冲为主的断层性质. 这一结果与汶川地震的野外考察、余震分布、震源机制一致.

3 反演算法与形变场重采样

InSAR 同震形变场数据反演中一个重要步骤是建立断层几何模型. 依据断层几何结构是否已知, 可将此类反演问题分为线性反演和非线性反演两大类. 第一类, 当断层地表破裂几何结构已知, 反演问题基本上是线性的; 大多数发生于板块间的地震即属于此类. 由于 InSAR 形变场是连续观测的, 拥有足够多和精度足够高的测地数据点, 可基于最大似然法则对问题进行线性最小二乘法求解^[15,16]. 当断

层地表几何破裂关系未知时, 反演问题归为第二类, 即非线性反演; 多数板块内部的地震属于此类. 对于此类非线性的滑动分布反演问题, 一般都要经过一定的方法将非线性问题转化为线性问题, 通常采用的做法有两种, 一是, 首先假设均匀滑动分布, 通过正演获得在均方差拟合最小时的断层破裂几何结构; 然后利用此断层几何结构, 去除均匀滑动分布假设, 运用线性反演的方法对形变数据进行拟合, 从而估算断层面非均匀滑动分布. 这类做法的缺点是均匀滑动分布的假设前提下获得的断层几何结构对断层面非均匀滑动分布反演而言未必就是最佳的断层模型. 另一类做法是, 通过其他手段如野外地质考察、遥感解译等获得较为精确的断层地表分布, 并据此建立反演所需的断层模型. 这样做的优点是断层几何结构较为准确, 缺点则是需要依赖除 InSAR 同震形变场之外的其他数据源. 在本研究中, 由于野外地质考察等已经获得较为精确的地表断层几何破裂带, 采用后者将非线性问题转化为线性问题, 并运用敏感性迭代拟合方法反演断层面非均匀滑动分布.

3.1 基于敏感性迭代拟合方法的线性反演

基于敏感性迭代拟合算法首先将给定的有限矩形断层离散化为许多的小矩形断层块(fault patches), 假定断层块内部滑动均匀分布, 依据设定的迭代次数, 通过构建均方差减小函数, 对模型与观测数据的均方差拟合效果进行评价, 迭代计算各断层块的滑动量, 最终得到与观测数据拟合均方差最佳时的模型预测滑动分布, 其计算过程示意如图 2.

对于线性反演问题, 利用格林函数将模型矢量与观测数据建立关系如式(1):

$$d(i, j) = S(x)G(m) + \epsilon, \quad (1)$$

$d(i, j)$ 为位置 (i, j) 的 InSAR 观测数据, 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.

由于 InSAR 形变场为视线向, 需对其进行分解

$$d(i, j) = ad_{up}(i, j) + bd_n(i, j) + cd_e(i, j), \quad (2)$$

d_{up} 、 d_n 、 d_e 分别为上、北、东向观测分量; (a, b, c) 为

雷达视线向单位矢量,由雷达入射角确定. 雷达图像的入射角在图像内部是变化的,本研究中尚未考虑这一变化对反演结果的影响,反演过程中均采用去除地球曲率影响后的雷达图像中心入射角,约为 34.3° , 则 $(a, b, c) = (0.756, -0.143, -0.639)^T$.

均方差减小函数 $\Delta\sigma_{rms}(x)$ 如式(3):

$$\Delta\sigma_{rms}(x) = \sigma_{rms}^{original} - \sigma_{rms}^{residual}(x)$$

$$= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}^2}{n}} - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (d_{ij} - G_{ij} s_j^{opt})^2}{n}}, \quad (3)$$

$$S(x) = A \cdot \Delta\sigma_{rms}(x) \parallel G(x) \parallel^a, \quad (4)$$

$S(x)$ 为断层块内部滑动量, A 比例因子, 由最小二

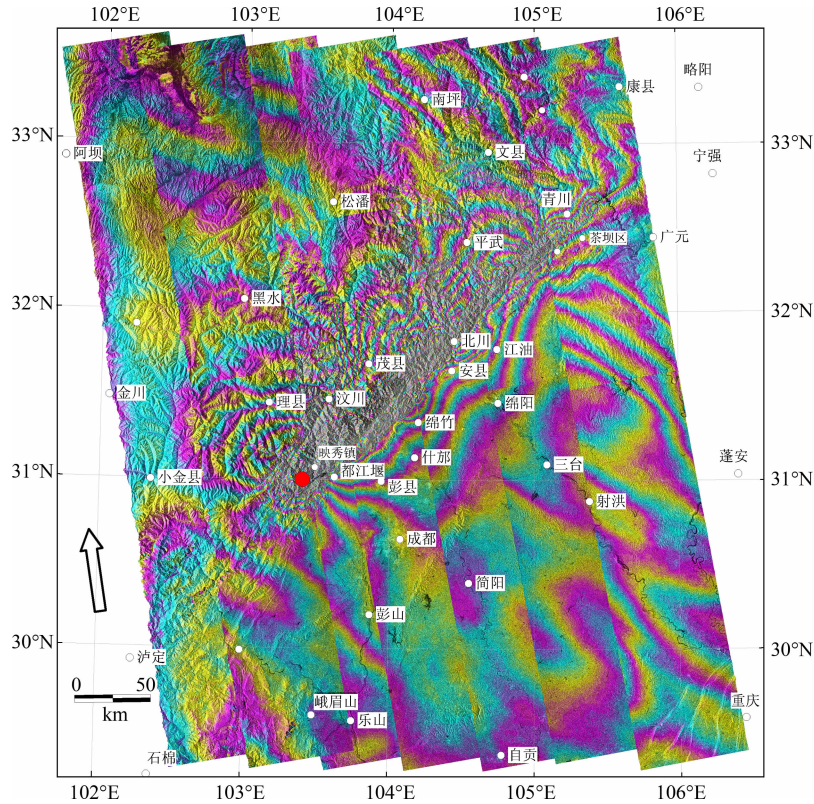


图 1 汶川地震 InSAR 同震形变场

缠绕的 InSAR 同震形变场, 红色实心圈为汶川地震主震位置(据中国地震台网中心); 空心箭头代表卫星运动方向, 其右视方向为卫星视线向.

Fig. 1 Co-seismic deformation of Wenchuan earthquake derived by InSAR

Red point is the epicenter of the Wenchuan earthquake (from China Earthquake information center). Arrow shows the flight direction of the ALOS satellite, and the right looking direction of it is line of sight (LOS).

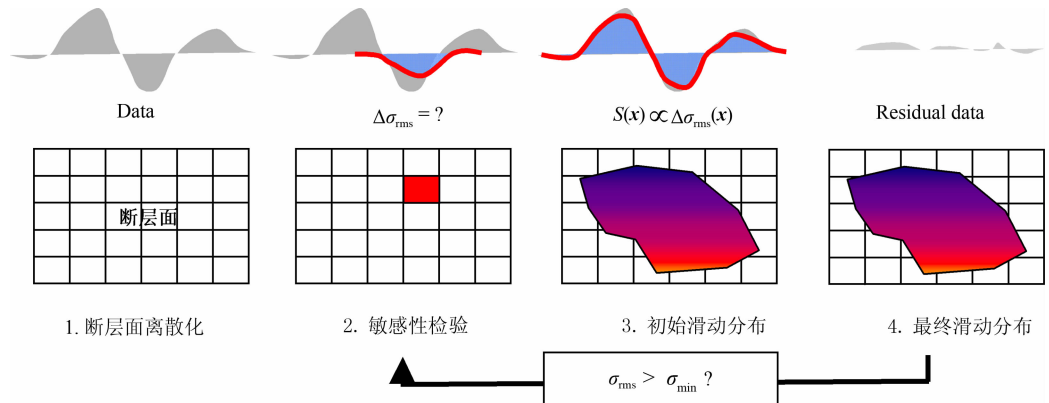


图 2 敏感性迭代拟合反演流程示意图

Fig. 2 The inversion flow chart of sensitivity-based iterative fitting method

乘法计算获得. $\Delta\sigma_{\text{rms}}(x)$ 即为均方差减小函数,它表征了两次迭代计算过程的模型优化程度. α 为迭代敏感系数,为寻求稳定性与分辨率之间的最佳拟合,一般采用格林函数的指数形式作为均方差减少函数的权重,即 $\|G(x)\|^\alpha$.

3.2 形变场重采样

InSAR 获得的形变场是连续的. 对于汶川地震的 InSAR 形变场而言,每个条带的数据点数约为 10^8 ,全部 7 个条带加起来,去除部分重叠区域的数据,将接近 10 亿个数据点,尽管可以对雷达数据进行多视处理以降低图像分辨率,但对于形变数据反演问题而言,过多的观测数据不仅不能提供更多的细节信息,而且是一般的计算系统所不能接受的,同时也将难以抑制由于噪声的存在而产生的计算结果难于收敛问题^[17],因而必须对形变场进行重采样. 由于 InSAR 数据所固有的误差因素如大气延迟效应、DEM 相位残差等,采样方案的好坏对反演结果的影响较大,好的采样方案可以有效抑制数据误差,从而突出有效信息,而差的采样方案则可能放大噪声的影响,从而使得反演过程不收敛或反演结果失真^[18]. 本研究中采用较常用的四叉树采样方案^[19],首先对形变场数据进行 10×10 的下采样处理,使得数据总量由十亿量级变成千万量级. 然后再对下采样后的数据进行四叉树重采样,设定采样的形变梯度阈值为 0.1,即形变梯度大于 0.1 时进行四叉树划分,而形变梯度小于 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. 考虑到在发震断层附近由于雷达数据的严重失相干性,形变值可能严重偏离实际,在形变场重采样中对相干性小于 0.5 的区域进行掩膜(Masking)处理,形变反演过程中不予考虑此部分数据,以免影响反演结果. 另外值得一提的是,由于地形或大气影响,472、473 与 476 条带部分数据误差较大,不能用于反演(图 3a);471 条带数据由于大气和电离层影响及震后形变明显,同样未用于同震位错的反演. 重采样后七个条轨道数据点数共约为 20000 个. 重采样后的形变场特征如图 3,断层北盘总体表现为向东或沉降运动,其最大视线向形变量值达 -1.2 m (与卫星之间的距离增加),南盘总体表现为向西或抬升运动,沿卫星视线运动最大值达 1.3 m .

4 滑动反演结果及分析

4.1 单断层模型反演结果

首先,采用单断层模型对汶川地震震源参数进行初级描述. 由于此次地震震级大,断层破裂几乎在所有分段均到达地表,这一点已为野外地质考察所证实,因而模型中假设断层破裂出露地表. 利用 8 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、深度等. 将单断层模型沿走向与倾向分成 60×30 的子断层,介质泊松比及迭代敏感系数 α 分别设定为 0.25 和 0.5,获得了模型预测与观测数据拟合均方差最小时的反演结果(表 2、图 4).

从模拟的干涉形变场及模型剩余残差分析(图 4(a,b)),形变场整体趋势显示了右旋逆冲特性,断层北盘干涉条纹密集,而南盘干涉条纹稀疏. 反演的整体形变剩余较大,其中远场形变剩余包含了较多的震后形变、余震及误差因素产生的干涉条纹,难以在同震形变场模拟中彻底消除. 与纪晨等利用 17 个宽频带地震台 P 波数据反演所获得的滑动分布相比,由于所使用的断层模型类似,断层面滑动分布在形态分布上也较为类似,均形成了三个较为明显的滑动分布集中区;然而,由于 InSAR 同震形变场数据中包含部分震前、震后形变信息,因而反演获得的断层面滑动分布数值也较大,且 InSAR 数据能反演获得更多的地表滑动分布. 反演获得的滑动分布主要集中在 $0 \sim 20 \text{ km}$ 深度左右(图 4c),最大滑动量为 10 m ,分布在汶川、映秀及北川等地区. 反演的滑动方向较为单一,以逆冲兼右旋走滑为主,部分区域有明显的纯逆冲(震中区附近)或纯右旋走滑运动(茂县地区).

反演获得的残差较大,主要原因有以下两个方面:(1)断层模型为单断层,较为简单;(2)由于地震学及野外地质考察研究结果均显示,汶川地震在震源破裂过程中震源机制随着时间和空间均在发生变化,包含多个破裂子事件、多个破裂阶段和多个破裂带. 因此,为了进一步从 InSAR 数据中获得更为精细的断层滑动分布及震源的空间破裂参数等,必须考虑采用多断层分段模型模拟 InSAR 形变数据;建立更为真实的地表破裂几何模型以寻求与观测数据的最佳拟合,将成为解决问题的必然途径.

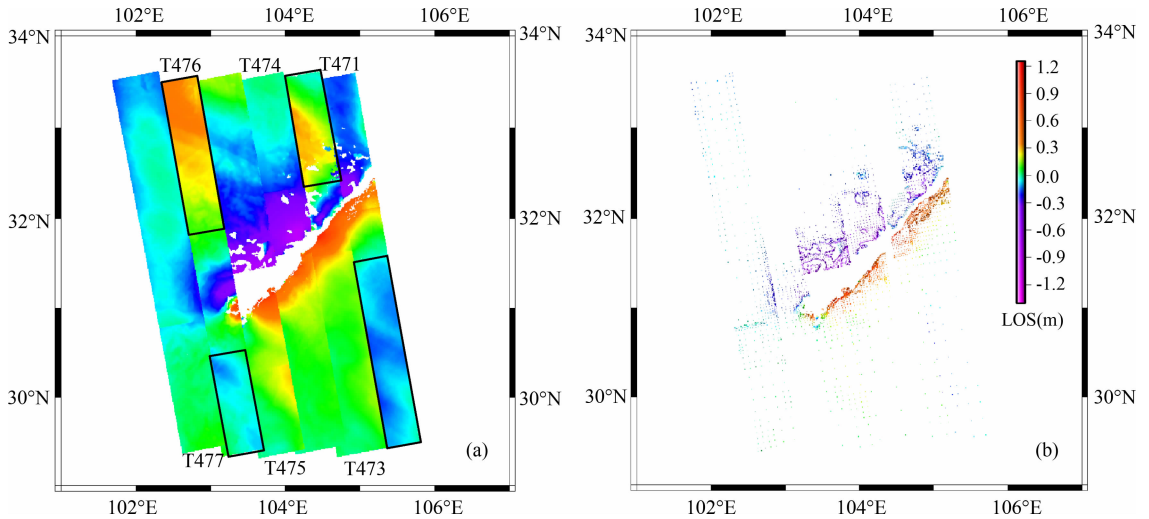


图 3 解缠后的汶川地震 InSAR 同震形变场

(a)解缠后的汶川地震同震形变场,黑色方框所示为未用于二叉树采样的区域;(b)二叉树采样后的形变场.

Fig. 3 Unwrapped InSAR data of the Wenchuan earthquake

(a) The unwrapped displacement field in LOS. Black boxes indicate the area where data error is too large to be used in inversion. (b) InSAR data after quad-tree downsampling.

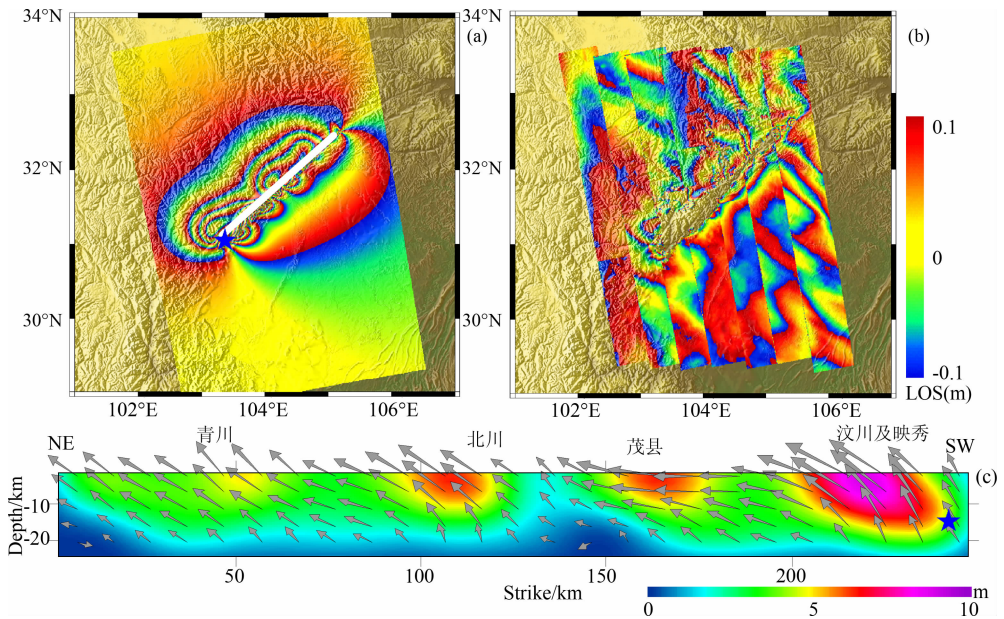


图 4 单断层模型反演结果

(a)正演获得的汶川地震 InSAR 同震形变场,白色线条表示断层模型在地表的走向示意,蓝色五角星为震源在地表的投影,地形数据依据 SRTM(下同);(b)正演模型残差;(c)反演获得的断层面非均匀滑动分布,黑色箭头指示断层走向,其上标出了北川、青川相对位置,空心箭头为滑动方向.

Fig. 4 Slip distribution of the Wenchuan earthquake from single fault model

(a)(b)Simulated InSAR interferograms and residuals;(c)Slip distribution along strike. White line is the fault model.

Blue pentagram is the epicenter. Arrows show the inverted rake.

4.2 多断层模型反演结果与分析

(1)五段断层模型的建立及初步模拟结果

从 InSAR 干涉形变场特征分析,在形变图像中央梯度最密集的区域显示一条线性分布的狭长条带,这是由于地震导致地表破裂而产生的非相关条

带,可以揭示断层在地表的线性几何分布.通过对比分析徐锡伟等的野外地质考察研究结果^[1,7]、地震学研究结果^[20]及 InSAR 形变场非相干性线性特征等资料^[14],建立了五段断层地表几何破裂分段模型(图5、表2).该断层分段模型在多数地方与野外地

表 2 滑动反演断层参数模型

Table 2 Fault model parameters of fault slip distribution inversion

断层模型	编号	纬度/(°)	经度/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	长度/km	平均滑动角/(°)	平均滑动量/m	M_w	残差/m
单段断层	—	32.42	105.15	223.7	40	250	134	6	7.9	0.3243
五段断层与 单一倾角模型	F1	31.06	103.56	252.8	40	21	75.7	4.3		
	F2	31.58	104.01	216.6	40	72.5	124.5	5.5		
	F3	31.62	104.19	258	40	18	158.3	3.1	7.9	0.3145
	F4	32.45	105.14	223.7	40	129	100	6.9		
	F5	31.65	104.4	223.6	40	74.8	105	7.8		
五段断层与 倾角线性变化模型	F1	31.06	103.56	222.2	70~33	21	78.6	5.3		
	F2	31.58	104.01	252.8	70~33	72.5	121.5	6.7		
	F3	31.62	104.19	216.6	70~33	18	145.3	3.1	7.9	0.3
	F4	32.45	105.14	258	70~33	129	98	7.6		
	F5	31.65	104.4	223.6	60~20	74.8	106.7	8.7		

质考察的地表破裂情况一致,但断层破裂的北东端点较之最早公布的野外地质考察结果远 30 km.

首先采用单一倾角的五段断层模型进行初步模拟(表 2),反演结果与正演的形变场及其模型残差如图 6. 尽管从模拟的形变场及其模型残差分析,由于采用较为真实的断层分段模型,反演模型残差较单断层模型进一步减小,但残差仍然较大;除去 InSAR 数据本身的误差因素之外,我们认为改善断层几何结构模型能进一步减小残差.

(2) 倾角线性变换的五段断层模型反演结果及分析

对断层倾角的优化处理,是减小模型残差并达到反演最佳效果的较为关键的步骤. 野外地质考察结果表明,断裂倾角在接近地表处较高($60^\circ \sim 70^\circ$),随深度向下逐渐变缓,大概到地下 20 多公里深处,3 条断裂收敛合并成一条剪切带,汶川地震就发生于此 3 条断裂的交界处(张培震等,2008)^[1];陈九辉等^[20]利用川西流动地震台阵观测数据和双差地震定位方法,对汶川地震的余震序列进行了精确重新定位,其余震深度分布剖面同样清晰地显示了映秀—北川断裂和灌县—江油断裂等在 20~22 km 深度合并为剪切带的特征. 因而本研究在五段断层模型基础上,建立了沿倾向线性变换的断层倾角参与的反演(图 5),获得了 InSAR 同震形变场模拟条纹及其形变预测模型残差(图 7)与断层面滑动分布(图 8).

图 7 显示了模拟的形变条纹与 InSAR 观测结果在形态上较之单断层模型及单一倾角五段断层模型有了很好的近似,且形变残差较小,平均残差为

0.3 m. 总体来看,五段断层模型与倾角线性变换的组合模拟已能较好解释 InSAR 数据. 另外,与 Hao 等^[22]的研究结果相比,尽管采用了不同的断层模型(Hao 文为两段断层模型),在断层附近的 InSAR 模拟条纹有所差异,但由于所采用的 SAR 数据基本相同,因而模拟获得的 InSAR 形变场整体特征也基本一致,均体现了发震断层强烈逆冲兼右旋走滑运动在地表所导致的形变场特征. 由于汶川地震的破裂方式较为复杂,且该区域 InSAR 数据应用中不可避免的误差因素等,因而,相对破裂方式较为单纯且 InSAR 数据应用条件较好的震例如 1997 年玛尼地震而言,残差水平较高^[23]. 这些误差因素可能包括震后形变、DEM 地形校正误差、大气残余误差等.

图 8 为此断层模型下反演获得的断层非均匀滑动分布. 断层面滑动分布主要集中在 0~20 km 深度. 从震源位置出发到达汶川及映秀等地区,形成了较大的滑动分布集中区,最高可达 8 m,滑动方式为具有较大的逆冲分量和一定的右旋走滑分量,平均滑动角为 97° (图 8d、图 8c);以纯右旋走滑的运动形式沿 SW-NE 方向发展,在 5~30 km 深度处形成了分布较广且滑动量平均可达 2~4 m 的区域(图 8c),这与在该地区的断层地表位错右旋分量较大较为一致(徐锡伟等,2008)^[8];继续沿 SW-NE 方向,之前的纯右旋走滑运动形式逐渐转化为强烈逆冲兼右旋走滑或逆冲兼右旋走滑的运动方式,且分别在北川、青川等地区形成了分布较广、滑动量巨大的区域,其中北川最高滑动量可达 10 m,平均滑动角为 119° ;青川地区最高滑动量可达 7 m,平均滑动角为 138° (图 8b、图 8e). 反演获得的矩张量为 $7.7 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$,

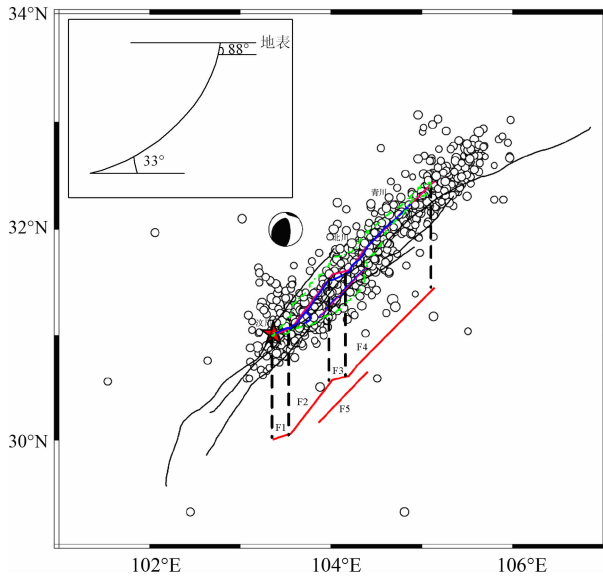


图5 汶川地震发震构造及断层分段模型示意图
 黑色线条为汶川地震的发展断层龙门山断裂带(据邓起东等^[21]),由北往南依次为汶川—茂汶逆断裂(后山断裂)、映秀—北川逆断裂(中央断裂)、彭县—灌县断裂(前山断裂);红色五角星为震源位置地表投影,空心圆圈为震后6个半月的余震分布;蓝色线条为野外地质考察所获得的地表破裂带分布,绿色虚线框为InSAR干涉图的非相干线性区域,粉色线条为依据非相干区域勾勒出的断层地表破裂分段特征,红色线段为本研究中使用的五段断层分段模型(为便于显示沿黑色虚线往南错位),F1-F5与表2中的编号一致;左上角内插框图代表断层倾角线性变化示意,88°/33°分别为模型中使用的断层最大/最小倾角.

Fig. 5 Seismogenic structure and fault model of the Wenchuan earthquake
 Blue curves and black lines indicate surface traces of coseismic ruptures and regional faults, respectively. Red pentagram is the epicenter of the earthquake. Aftershocks are from NEIC. The inset at the left top denotes the dip angle used in the inversion, 88°/33°

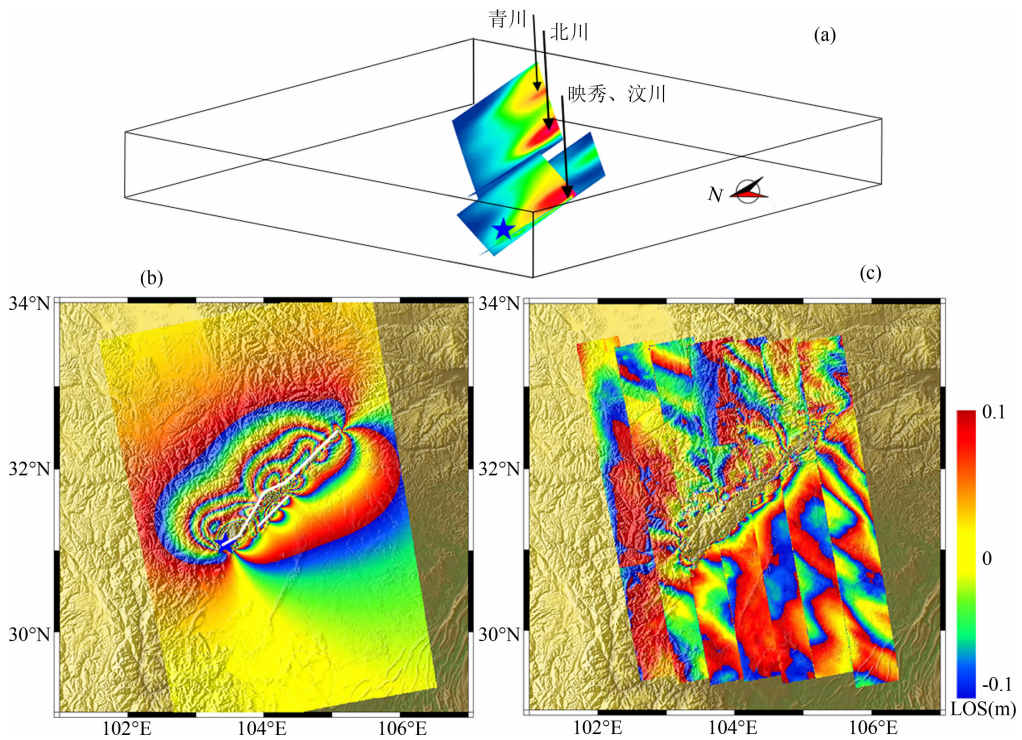


图6 五段断层模型及单一倾角模拟结果

(a)单一倾角五段断层模型反演的滑动分布三维显示结果;(b)单一倾角的五段断层模型正演获得的汶川地震InSAR同震形变场;白色线条代表五段断层分布示意;(c)五段断层模型正演模型残差.

Fig. 6 Slip distribution using five segment fault model with uniform dip angle

(a)3-D overview of the slip distribution;(b)(c)Simulated interferograms and residuals from uniform dip angle, respectively.

依据 Kanamori 等^[24] 震级计算公式,汶川地震的矩震级达 M_w 7.9.

本研究中的断层模型 F1 至 F4 与汶川地震的主地表破裂带北川—映秀断裂在地表位置上基本重合,断层模型 F5 则基本和灌县—江油断裂重合.野外地质考察的研究结果显示,北川—映秀断裂主要以逆冲运动兼有右旋走滑分量为,本研究揭示了

这种地表破裂形式中地壳深度的动力成因;另外值得一提的是,我们将断层模型延伸到了余震分布仍然较密集的四川青川、甘肃宁强等地区,滑动分布反演结果显示,该区域 10~15km 深度孕育着分布广泛的较大滑动量,且以具有一定右旋走滑分量的逆冲形式运动至地表,与王卫民等^[25] 利用远场体波波形记录结合近场同震位移数据反演获得的研究成果

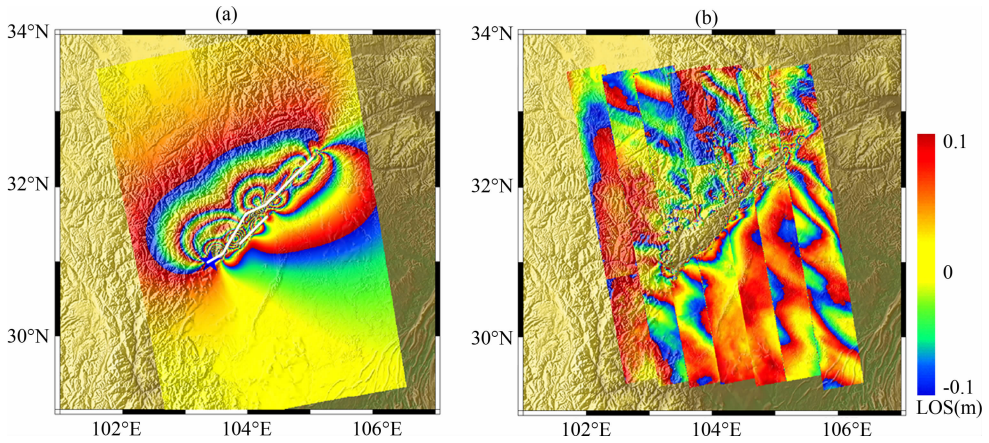


图 7 五段断层模型与断层倾角线性变化的模拟结果

(a) 倾角线性变化的五段断层模型正演获得的汶川地震 InSAR 同震形变场; (b) 五段断层模型正演模型残差.

Fig. 7 Simulated interferogram (a) and residuals (b) using five segment fault model with linear variable dips

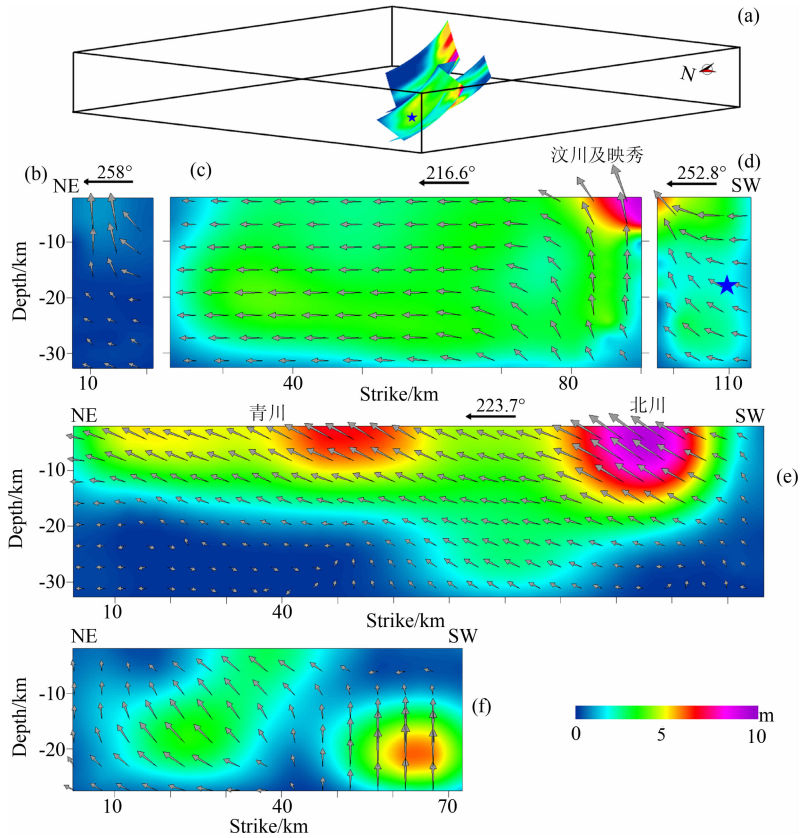


图 8 断层面非均匀滑动分布反演结果

(a) 断层滑动三维透视图; (b)~(f) F1~F5 投影至平面的显示结果, 由左至右的方向为 NE-SW, 断层编号与表 2 一致.

Fig. 8 Slip distribution of five segment dislocation model with linear changed dip angles

(a) 3-D overview of the slip distribution; (b)~(f) are the slip distribution of each segments projected to the down-dip direction.

较为一致.

5 结 论

InSAR 形变场数据反演可获得较高空间分辨

率的断层面非均匀滑动分布. 通过构建多种有限断层模型, 基于线弹性反演理论及敏感性迭代拟合算法, 反演了汶川 $M_w7.9$ 地震的 InSAR 同震形变场. 获得以下几点认识:

(1) 由于汶川地震破裂带较长, 单断层模型模拟

的 InSAR 同震形变场及其模型剩余残差均不甚理想,无法很好地解释 InSAR 形变数据.单一倾角的五段断层模拟的形变场条纹在断层南盘与 InSAR 观测结果有较大差别,同样无法很好解释 InSAR 数据.采用倾角线性变换的五段断层模型能很好地解释 InSAR 数据,不仅模拟的形变场条纹与观测结果吻合较好,而且形变残差达到最小.

(2)倾角线性变换的五段断层模型的反演结果显示,滑动分布主要集中于地下 0~20 km 左右,最大滑动量达 10 m;其中滑动分布较为集中的区域分别位于汶川、北川与青川地区;汶川及映秀等地区为此次地震震源破裂开始的区域,其 10~20 km 深度处孕育了较大的滑动量,最高可达 5 m,且分布范围较广,逆冲至地表则最高可达 10 m;多条断裂经过的北川地区(北川—映秀断裂及灌县—江油断裂),深部与地表滑动量最高均达 10 m,因而其地表破坏程度也最强烈;青川地区的滑动分布主要集中于地下 0~10 km,最高滑动量为 8 m,如此大的滑动分布与该地区在震后数月仍然余震分布密集的事实相对应.

(3)从反演的滑动方向分析,由震源附近出发沿 SW-NE 方向,断层面的滑动角有明显转换.在汶川等地区以强烈的逆冲及一定的右旋走滑运动为主,其平均滑动角为 97°;在经历了一个几乎纯右旋走滑运动之后,逐渐又转变为逆冲兼右旋走滑为主,其中北川地区的平均滑动角约为 119°,青川地区的平均滑动角为 138°;

(4)反演获得的矩张量为 7.7×10^{20} N·m,矩震级达 $M_w 7.9$.

致 谢 文中图件绘制使用了 GMT4.3 (Generic Mapping Tools) 绘制.另外,作者对两位审稿专家提出的建设性意见表示衷心的感谢!

参考文献 (References)

[1] 张培震,徐锡伟,闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震震源断裂带滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 2008, **51**(4):1066~1073
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May 12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1066~1073

[2] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central-Asia. *Geophysical Research Letters*, 1993, **20**:895~898

[3] Steven N Ward, Gianlucar Valensise. Fault parameters and

slip distribution of the 1915 Avenzano, Italy, earthquake derived from geodetic observations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1989, **79**(3):690~710

[4] 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. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, **92**(1):278~299

[5] Lasserre G C, Peltzer F, Crampe', 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

[6] Mahdi Motagh, Rongjiang Wang, Thomas R Walter, et al. Coseismic slip model of the 2007 August Pisco earthquake (Peru) as constrained by Wide Swath radar observations. *Geophys. J. Int.*, 2008, **174**:842~848

[7] 陈运泰,许力生,张勇等. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告. 中国地震信息网, <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>. 2008[2008-05-14]
Chen Y T, Xu L S, Zhang Y, et al. The report of source characteristics of the May 12, 2008 Wenchuan Earthquake. Earthquake Information Center, China Earthquake Administration. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>. 2008[2008-05-14]

[8] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, **30**(3):597~629
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3):597~629

[9] 何宏林,孙昭民,王世元等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带. 地震地质, 2008, **30**(2):359~362
He H L, Sun Z M, Wang S Y, et al. Rupture of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake along Baishanhe river. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(2):359~362

[10] Ji Chen, Gavin Hayes. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w 7.9$ eastern Sichuan, China earthquake. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php

[11] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile fault in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1985, **75**:1135~1154

[12] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile fault in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 1992, **82**:1018~1040

[13] 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

[14] 屈春燕,宋小刚,张桂芳等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震 InSAR 同震形变场特征分析. 地震地质, 2008, **30**(4):1076~1084

- Qu C Y, Song X G, Zhang G F, et al. Analysis on the characteristics of InSAR coseismic deformation of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(4):1076~1084
- [15] Du Yijun, Atilla Dydin, Paul Segall. Comparison of various inversion techniques as applied to the determination of a geophysical deformation model for the 1983 Borah Peak earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1992, **82**(4):1840~1866
- [16] Yukitoshi Fukahata, Tim J Wright. A non-linear geodetic data inversion using ABIC for slip distribution on a fault with an unknown dip angle. *Geophys. J. Int.*, 2008, **173**:353~364
- [17] Rowena B Lohman, Mark Simons. 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
- [18] 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 $M_w7.5$ 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
- [19] Jonsson S, Zebker H, Segall P, et al. Fault slip distribution of the 1999 $M_w7.1$ Hector Mine, California, earthquake, estimated from satellite radar and GPS measurements. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, **92**(4):1377~1389
- [20] 陈九辉,刘启元,李顺成等.汶川 $M_s8.0$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究.地球物理学报,2009,**52**(2):390~397
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2):390~397
- [21] 邓起东,陈社发,赵小麟.龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学.地震地质,1994,**16**(4):389~403
Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1994, **16**(4):389~403
- [22] Ken Xiansheng Hao, Hongjun Si, Hiroyuki Fujiwara, et al. Coseismic surface-ruptures and crustal deformations of the 2008 Wenchuan earthquake $M_w7.9$, China. *Geophys. Res. Lett.*, 2009, **36**, L11303, doi:10.1029/2009GL037971
- [23] Garth J Funning, Barry Parsons, Tim J. Wright. Fault slip in the 1997 Manyi, Tibet earthquake from linear elastic modelling of InSAR displacements. *Geophys. J. Int.*, 2007, **169**:988~1008
- [24] Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**:2981~2987
- [25] 王卫民,赵连锋,李娟等.四川汶川 8.0 级地震震源过程.地球物理学报,2008,**51**(5):1403~1410
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1403~1410

(本文编辑 胡素芳)