

王 敏. 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5.12 汶川大地震破裂空间分布. 地球物理学报, 2009, 52(10): 2519~2526, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.010

Wang M. Coseismic slip distribution of the 2008 Wenchuan great earthquake constrained using GPS coseismic displacement field. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(10): 2519~2526, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.010

## 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5.12 汶川大地震破裂空间分布

王 敏

中国地震局地质研究所, 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 2008 年 5 月 12 日发生在四川汶川的大地震造成映秀—北川断裂和灌县—江油断裂同时破裂, 分别形成了 240 多公里和 70 多公里的地表破裂带. 本文以 GPS 观测获得的同震位移场为约束, 反演地震破裂的空间分布. 反演结果显示映秀—北川主破裂带倾向北西, 沿破裂带的走向从南到北倾角逐渐变大, 破裂断层的平均宽度在 10~18 km 左右. 破裂断层的错动在南段以逆冲为主, 在北段走滑分量逐步加大, 右旋走滑成为断层破裂的主要特征. 断层破裂最大段落错动量分别达到了 7.8 m 和 7.4 m, 恰好对应这次地震中地表破坏最为严重的映秀和北川地区. 本次地震释放地震矩  $6.70 \times 10^{20} \text{ N} \cdot \text{m}$ , 相应矩震级  $M_w = 7.9$ .

**关键词** 汶川地震, GPS, 同震位移, 破裂空间分布

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.010

中图分类号 P315

收稿日期 2009-05-26, 2009-09-11 收修定稿

### Coseismic slip distribution of the 2008 Wenchuan great earthquake constrained using GPS coseismic displacement field

WANG Min

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

**Abstract** The May 12, 2008 Wenchuan earthquake ruptured the Yingxiu-Beichuan and Guanxian-Jiangyou faults, and produced surface ruptures of  $\sim 240$  km and  $\sim 70$  km in length along the two faults, respectively. In this study, the coseismic displacement field derived from GPS observations collected before and after the quake is used to invert for the fault geometry and slip distribution of the rupture. The result shows that the Yingxiu-Beichuan fault dips to the northwest at a moderate angle of  $\sim 41^\circ$  at the southwest end, and the fault plane gets progressively steeper northeastward along strike, reaching a dip angle of  $\sim 73^\circ$  at Qingchuan. The averaged width of fault plane is 10~18 km. Slip caused by the earthquake is characterized mainly by thrust motion with a modest right-lateral strike slip component at the south segment of the fault. As the rupture travelled farther northeastward, the thrust component tapers down gradually, and the dextral component becomes dominant at the northeast end of the rupture. The slip distribution on the Yingxiu-Beichuan fault shows two high-slip concentrations of up to 7.8 m and 7.4 m, respectively. The two high-slip concentrations are just near the Yingxiu town and Beichuan city, which suffered the greatest fatalities and structure damages during the quake. The seismic

moment release is estimated to be  $6.70 \times 10^{20}$  N · m, corresponding to an  $M_w$  7.9 earthquake.

**Keywords** Wenchuan earthquake, GPS, Coseismic displacement, Slip distribution

## 1 引言

2008年5月12日发生在四川汶川的大地震,震源位于龙门山断裂带的映秀—北川断裂南段,龙门山断裂带位于青藏高原东缘,由汶川—茂县、映秀—北川和灌县—江油三条主干断裂组成,晚更新世以来构造活动性表现为逆冲右旋<sup>[1,2]</sup>.地震发生后,地质考察表明地震造成映秀—北川断裂和灌县—江油断裂同时破裂,分别形成了240多公里和70多公里的地表破裂带,其最大垂直错距和右旋水平错距分别达到了6.2 m和4.9 m,沿整个破裂带的平均错距达2~3 m<sup>[3]</sup>.同时,一些学者利用地震波数据反演地震的破裂过程和断层面的静态位错分布,指出震源破裂具有逆冲兼右旋走滑性质,破裂深度10~28 km,断层面的最大位错7~12 m<sup>[4~6]</sup>.

汶川地震在地表破裂类型、破裂宽度和几何结构等方面具有非常鲜明的特色,是迄今为止地表破裂结构最复杂、破裂长度最长、同时兼有逆冲和右旋走滑分量的一次板块内部逆断层型特大地震事件.但由于地质学的方法很难提供全面、精确的地表位错结果且不能触及破裂断层的深处,而地震波反演同样缺乏对断层破裂宽度等几何参数的约束,所以截止到目前为止,对于汶川地震各断层段的破裂量值、破裂宽度和几何结构还缺乏统一、精确的研究.由GPS技术获得的高精度地震同震位移结果,特别是近场的同震位移结果,对破裂断层的几何结构有很好的约束,为定量研究各断层段的破裂量值、破裂宽度和几何结构提供了可能.

本文采用167个GPS点的同震水平位移和49个GPS点的同震垂直位移数据约束反演汶川地震的破裂分布,特别是映秀—北川断裂同震破裂断面不同段的倾角和宽度.这些数据主要来源于地震发生后中国地震局和国家测绘局对龙门山和川西地区已有GPS点的复测<sup>[7]</sup>,同时补充使用了中国地震局地震研究所和地质研究所在震区获得的一些GPS点的复测数据(鉴于篇幅有限,数据不在此列表给出).由GPS原始观测数据导出地震同震位移的方法参见文献<sup>[7]</sup>.图1给出了地震近场和中场的GPS点同震位移结果(图中所示误差已进行了改化,改化的缘由和方法见下文).

## 2 同震破裂模型和反演方法

地质考察得到映秀—北川断裂的地表破裂西起汶川县映秀镇以西(31.061°N, 103.333°E),东止于平武县水观乡以东与青川县交界地带(32.233°N, 104.878°E)<sup>[3]</sup>,但余震分布却延伸到了地表破裂西南端以远30 km处和东北端以远65 km处<sup>[8]</sup>,表明部分断层破裂没有达到地表.本文确定了一个长度为340 km的映秀—北川主破裂带模型,并根据基本的破裂特征和余震分布将其分成8段.汶川地震地表破裂的几何结构非常复杂,由于缺乏足够的GPS同震位移观测约束,逐一确定每一段的倾角和宽度存在困难.为此,在反演确定每一段的走滑量和倾滑量的同时,只分别估计虹口—清平段(对应于模型中的1~3段)、清平—南坝段(对应于模型中的4~6段)及南坝—青川段(对应于模型中的7~8段)的平均倾角和宽度.

将沿灌县—江油断裂的破裂断层作为单独一段纳入反演模型.由于在灌县—江油断裂与映秀—北川断裂间缺乏GPS观测约束,反演确定灌县—江油破裂断层的全部几何参数和滑移参数存在一定困难.地质考察表明灌县—江油破裂带为纯逆冲断层型破裂,故先验设定该断层段的走滑量为0,倾角为35°<sup>[3]</sup>.

GPS测定的同震位移场显示在映秀—北川段西南存在一个条带,其同震水平位移向西衰减速率明显小于周边地区.考虑导出GPS同震位移所用震后观测数据为震后数星期内获得,这一地区表现为同震位移的位移量很可能部分来源于映秀—北川铲型断裂下部低角度断层段的震后滑移.基于此,在反演模型中加入模拟铲型断层、下部倾角为0°的3个水平段,与模型中的1~3段相接于破裂断层底部,即3个水平断层段的深度取决于1~3段破裂的倾角和宽度.

设断层段*i*的倾角为 $\delta_i$ 、宽度 $w_i$ 、走滑分量 $s_i$ 、倾滑分量 $d_i$ ,  $i=1, 2, \dots, 12$ . GPS点*j*的同震位移 $y_j^i$ 的误差方程可表示为:

$$v_j^i = \sum_{i=1}^{12} f_j^i(\delta_i, w_i, s_i, d_i) - y_j^i, \quad (1)$$

$$p_j^i = [1/\sigma_j^i]^2, \quad (2)$$

其中,  $f_k^i$  为半无限空间中断层剪切位错导致的地表位移的解析表达式<sup>[9]</sup>,  $\sigma_k^j$  和  $v_k^j$  分别是  $y_k^j$  的先验误差和残差,  $p_k^j$  为  $y_k^j$  的权重. 如  $j$  点有三维结果, 则  $k=1, 2, 3$ , 依次对应东西向、南北向和垂向分量; 如  $j$  点只有水平方向的结果, 则  $k=1, 2$ , 分别对应东西向和南北向分量. 先验条件为  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ ,  $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3$ ,  $\omega_4 = \omega_5 = \omega_6$ ,  $\delta_4 = \delta_5 = \delta_6$ ,  $\omega_7 = \omega_8$ ,  $\delta_7 = \delta_8$ ,  $\delta_9 = 35^\circ$ ,  $s_9 = 0$  及  $\omega_{10} = \omega_{11} = \omega_{12}$ ,  $\delta_{10} = \delta_{11} = \delta_{12} = 0^\circ$ . 由于在求导同震位移的过程中忽略了震后蠕滑等因素的影响, 对非连续观测的 GPS 点而言, 同震位移的真实误差往往高于计算得到的标准差; 更为重要的是, 实际断层的几何形状、位错分布都是非常复杂的, 采用简单的分段模型势必会造成 GPS 观测结果与模型的不一致. 这种不一致性是 GPS 点和断层的相对位置相关的, 一般来说越靠近断层, 位移量越大, 差异越大. 为此采用下述方法确定同震位移结果先验误差: 2 个水平分量的先验误差等于计算得到的标准差加水平位移矢量模的平方根, 垂直分量的先验误差等于计算得到的标准差加垂向位移矢量模的平方根(运算一律以 mm 为单位).

(1) 式中包含矩形断层的倾角和宽度 2 个几何参量以及走滑和倾滑 2 个滑移参量, 其中滑移参量是地表位移的线性参量, 可以通过最小二乘方法一次求解, 而断层的几何参量与地表位移呈非线性关系, 求解相对复杂. 为了简化过程, 仅反演断层的走滑和倾滑参量, 而对断层倾角和宽度进行正演迭代. 具体的作法是对断层的倾角和宽度共 8 个参数进行

组合迭代, 倾角的迭代步长  $1^\circ$ , 宽度的迭代步长 1 km (宽度  $> 10$  km) 或 0.5 km (宽度  $< 10$  km); 每次每个参数取相邻二点, 考虑所有可能的参数组合样本, 对每一个样本即倾角和宽度给定情况下对滑移参量进行反演. 从众多反演结果中找出拟合后残差  $\chi^2$  最小者, 以此为基础向残差减小方向迈进一步进行新的参数组合与反演, 直至结果收敛为止. 走滑和倾滑参量的误差由最小二乘估计直接给出, 而倾角和宽度的误差, 根据模型和观测值的符合程度即通过对拟合后残差  $\chi^2$  的 F 检验, 确定其 90% 的置信区间(具体作法参见参考文献[10, 11]).

由于断层破裂模型中的水平断层段仅是根据区域同震位移场所反映出的衰减特征设定的, 其存在的范围和必要性缺乏数据的直接支持, 为此进行 2 步显著性检验(F 检验). 首先对反演得到的错动量相对较小(右旋走滑 62 mm、逆冲倾滑 36 mm)的第 12 断层段相对于其他 11 段模型存在的显著性进行检验, 结果表明其存在的显著性仅为 51.8%; 其次, 对另 2 个水平段相对于其他 9 段模型存在的显著性进行检验, 结果表明其存在的显著性为 98.6%. 最终确定了如图 2 所示的 11 段断层破裂模型.

### 3 反演结果与讨论

表 1 和图 2 分别是反演得到的断层破裂模型参数和图示. GPS 点同震位移的模型结果标示于图 1. 从图 1 可以看出观测结果和模型结果基本符合, 说

表 1 断层破裂模型参数

Table 1 Parameters of coseismic rupture model

模型 分段	起始位置		倾角( $^\circ$ )		宽度(km)		走滑 <sup>2</sup> (mm)	倾滑 <sup>3</sup> (mm)	地震矩 ( $10^{20}$ N·m)		
	经度( $^\circ$ )	纬度( $^\circ$ )	估值	置信区间 <sup>1</sup>	估值	置信区间 <sup>1</sup>			走滑	倾滑	总量
1	103.20	30.75					859±163	-2050±138	0.151	0.361	0.391
2	103.49	31.00	41	40~43	15	13~17	2298±160	-7474±122	0.480	1.560	1.632
3	103.83	31.30					4188±356	-700±373	0.915	0.153	0.928
4	104.17	31.63					3956±426	-3764±312	0.394	0.375	0.544
5	104.41	31.77	46	43~48	12	10~13	4850±223	-5541±134	0.524	0.598	0.795
6	104.61	31.98					3959±158	-3194±105	0.549	0.442	0.705
7	104.88	32.24	73	70~76	15	12~18	5200±201	-3921±492	0.740	0.558	0.927
8	105.14	32.42					1179±80	-381±136	0.213	0.069	0.224
9	103.84	31.17	35*		5.5	4.5~7.0	0*	-6184±471		0.553	0.553
10	103.12	30.82	0*		112	106~117	124±44	-293±50	0.163	0.385	0.418
11	103.40	31.07					62±54	-294±45	0.096	0.458	0.468

注: 1. 置信水平 90%; 2. 右旋走滑为正; 3. 逆冲倾滑为负; \* 先验约束值.

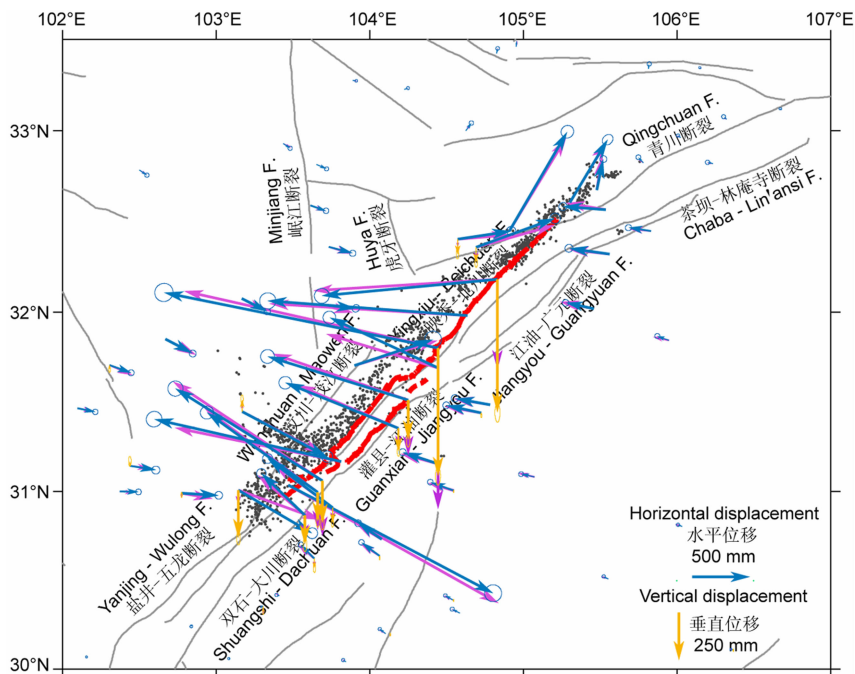


图 1 GPS 点同震位移的观测结果和模型结果

红线为地表破裂痕迹；灰色点代表余震位置；蓝色和黄色箭头分别为 GPS 点同震水平位移和垂直位移的观测结果，误差椭圆的置信水平为 70%；粉色箭头为模型结果。

Fig. 1 GPS-observed and model-predicted coseismic displacements

Red curve is the surface trace of the coseismic rupture. Gray dots show the Wenchuan aftershocks. Blue and yellow arrows are the observed horizontal and vertical coseismic displacements respectively, the error ellipses are at 70% confidence. Pink arrows are the coseismic displacements predicted by model.

明模型较好地反映了汶川地震的断层破裂状况。

反演结果揭示汶川地震的主破裂带倾向北西，沿破裂带的走向从南到北倾角逐渐变大，到青川附近已达到  $73^\circ$ ，表明这次地震的破裂具有明显的分段性。这一结果与以往人们对映秀—北川断裂的认识<sup>[12, 13]</sup>及震后地质考察的结果<sup>[3]</sup>是一致的。断层破裂的宽度在  $10 \sim 18$  km 左右，与主震的震源深度  $12 \sim 19$  km<sup>[14~16]</sup>有一定的可比性。余震序列重新定位的结果<sup>[8]</sup>显示主破裂带的余震分布基本以 20 km 为底边界，也表明主破裂带破裂宽度的差异性不大。由于本模型假定断层面均匀破裂，反演得出的破裂深度应当反映破裂的平均深度，所以略小于其他研究得到的结果亦属正常。与众多地震波反演的结果无异<sup>[4~6]</sup>，本模型反演结果同样揭示这次地震的性质是逆冲兼右旋走滑，在破裂带南段断层的错动以逆冲为主，特别是在发震断层的起始段逆冲分量明显大于走滑分量；在北段（北川以北）断层面的走滑分量逐步加大，右旋走滑成为断层破裂的主要特征。

模型第 2 段和第 5 段的错动量最大，分别达到了 7.8 m 和 7.4 m，恰好对应这次地震中地表破坏最为严重的映秀和北川地区，释放的地震矩分别为

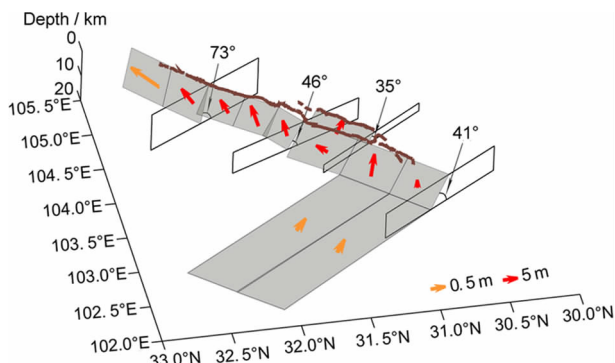


图 2 破裂断层的几何结构和错动量

Fig. 2 Geometry and slip distribution of rupture faults

地震总能量的 24% 和 14%。震后地质考察沿映秀—北川地表破裂带的观测点基本上集中于模型的第 2、第 5 和第 6 段，平均的垂直错距和水平错距<sup>[3]</sup>总体上都小于本文的反演结果，说明断层在地表的破裂可能并不完全或破裂弥散在几个破裂带或较宽范围的破裂区。

由于在映秀—北川主破裂带和灌县—江油破裂带之间没有 GPS 同震位移观测，虽然对第 9 段（对应灌县—江油断裂）的倾角和走滑分量施加了强约束，但参数估计中第 3 段和第 9 段之间似乎依然产生了

权衡取舍,估计得到的第 3 段倾滑量仅为 0.7 m,而第 9 段则达到了 6.2 m. 在其他约束条件不变的情况下,如果将第 9 段的倾滑量以 0.5 m 的先验精度约束于地质考察得到的平均值 2.18 m<sup>[3]</sup>(第 3 段对应地质考察的空白区),则反演结果为第 9 段的断层宽度 6.5 km,第 3 段和第 9 段的倾滑量分别为 1.6 m 和 4.4 m,1~3 段的倾角和宽度分别有 1° 和 1 km 的变化,而其他段都没有改变,滑移量的变化也在原估值的误差范围之内. 这表明模型已经较好地模拟了地表形变,但缺乏区分两个不同形变源的能力. 另一方面,由于采用的是一个 11 段的简单模型,反演得到的错动量反映的是各断层段的平均错动量,与断层段的大小密切相关. 相比之下,每个断层段释放的地震矩更具有物理意义. 虽然第 9 段的倾滑量达到了 6.2 m,但由于估计得到的断层宽度仅有 5.5 km,其释放的地震矩只占到了总地震矩的 8%,表明反演结果在总体效果上还是合理的.

已有研究表明在松潘—甘孜地块及龙门山推覆体的中地壳中存在低速层<sup>[17]</sup>,映秀—北川断裂在 15~20 km 的深度上倾角近于水平并入中地壳的低速层<sup>[3,18]</sup>. 刘启元等<sup>[19]</sup>通过 S 波波速结构分析发现低速层成区域状,其沿 31°N 剖面的宽度~120 km. 本模型结果也表明在松潘—甘孜地块的地壳中确实存在区域状低速滑脱层. 但需要特别指出的是,低速滑脱层不会产生震时破裂,2 个水平断层段的滑移主要是拟合了滑脱层的震后滑移. 由于震后 GPS 观测只有一期,而且不是在地震发生后的第一时间进行的,所以无法将震后滑移和同震位移区分开来<sup>[7]</sup>.

龙门山断裂带作为青藏高原和华南地块的边界构造带,具有十分复杂的地质结构及介质性质. 已有研究表明松潘—甘孜地块和四川盆地的地壳及上地幔速度结构和地壳结构形态具有显著性的差异<sup>[19~21]</sup>,而且四川盆地巨厚的沉积层也使其介质具有明显的分层特征. 由于 GPS 观测资料及其点位的空间分布都极其有限,本模型反演中采用了均一的半空间弹性介质,P 波和 S 波的波速比  $k \approx 1.78$ ,而这一假定势必会对模型结果产生影响. 地壳泊松比和地壳厚度是描述地壳结构和介质性质的两个重要参数,而 P 波和 S 波的波速比  $k$  与泊松比密切相关,能对地壳成分提供比较强的约束. 参考该地区速度结构的研究成果<sup>[20~23]</sup>确定不同深度  $k$  值的取值范围为 1.63~1.87,然后采用不同的  $k$  值进行反演计算. 结果表明  $k$  值在 1.63~1.87 范围内变化对破裂断层几何结构的影响在其误差范围之内(见表 2),

表 2 不同波速比条件下破裂断层的几何参数

Table 2 Geometry parameters of rupture faults corresponding to different wave velocity ratio

几何参量	$k=1.63$	$k=1.68$	$k=1.73$	$k=1.78$	$k=1.87$
$\delta_1 - \delta_3 (^{\circ})$	42	42	42	41	41
$\delta_4 - \delta_6 (^{\circ})$	45	45	45	46	46
$\delta_7 - \delta_8 (^{\circ})$	71	71	72	73	73
$w_1 - w_3$ (km)	14	14	14	15	15
$w_4 - w_6$ (km)	12	12	12	12	12
$w_7 - w_8$ (km)	15	15	15	15	15
$w_9$ (km)	5.5	5.5	5.5	5.5	5.5
$w_{10} - w_{11}$ (km)	114	113	113	112	112

对错动量的影响最大不超过 7%. 由此可以推断忽略了不同区域、不同深度的介质差异对本模型的影响有限. 事实上,本模型的误差主要还是来源于采用有限分段、段内均匀滑动模型对破裂带的简单近似.

假定震区地壳介质的平均剪切模量为  $3.0 \times 10^{10}$  Pa(本文研究主要涉及上地壳),则反演得到汶川地震释放的标量地震矩为  $7.58 \times 10^{20}$  N·m,根据 Kanamori 公式<sup>[24]</sup>,得到相应的矩震级  $M_w = 7.92$ . 如果扣除水平断层段震后滑移的影响,标量地震矩为  $6.70 \times 10^{20}$  N·m,相应的矩震级  $M_w = 7.88$ ,与美国地震调查局<sup>[15]</sup>和美国哈佛大学<sup>[16]</sup>给出的震级相一致.

#### 4 同震位移场的特征分析

根据反演得到的沿地表破裂带断层面错动分布,计算断层面错动造成的地表水平位移场和垂直位移场(图 3 和图 4). 考虑第 10、11 断层段的滑移可能主要源于震后形变,为此在计算中忽略了这两段的贡献. 水平位移场清晰地反映了地壳的剧烈缩短和地表破裂带北段显著的右旋走滑. 此外,还可以看到同震水平位移的影响大致可延伸到映秀—北川断裂两侧各~700 km 的范围,断裂两侧距断裂~5 km 范围内的位移大于 3 m,地表的水平位移接近 4.7 m,位于震中<sup>[14]</sup>东北约 50 km 处. 在断裂的南段,同震水平位移在断裂两侧向西的衰减速度低于向东的衰减速度,这与 InSAR 观测到的地表形变特征相一致<sup>[25]</sup>,也与目前对汶川地震构造成因的认识相符.

地震造成的最大垂直位移略小于最大水平位移,而且垂直位移的影响范围明显小于水平位移. 断

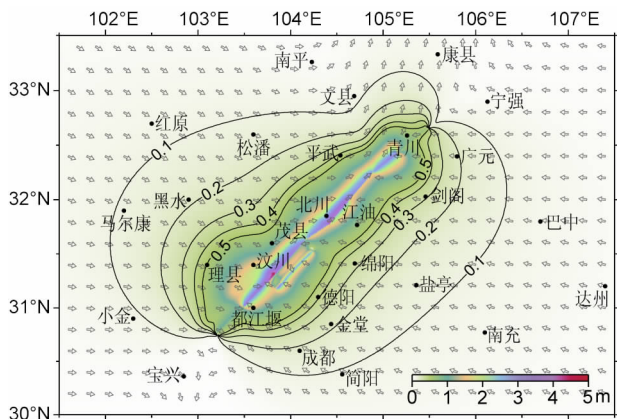


图3 模型计算的地表水平位移

小箭头表示位移矢量的方向。

Fig. 3 Surface horizontal displacement predicted by coseismic rupture model

The small arrows show the direction of displacement vectors.

裂以东以下降为主,但消止于宁强—剑阁—绵阳—简阳—泸州一线,最大下降量 $\sim 1.5$  m出现在青川县石坎乡附近.断裂西侧近断裂 $10\sim 20$  km的范围内地表处于抬升状态,最大的抬升量 $\sim 4.0$  m发生在震中附近;但由此往西,形变转变为以下降为主要特征.这种同震形变的波状起伏状态与以往对一些逆冲断层性地震的观测结果相同<sup>[26~28]</sup>.

## 5 结论

在有限的先验条件约束下,通过反演 GPS 观测得到的同震位移场,获得了汶川地震断层破裂产状和破裂分布.结果显示:

(1)映秀—北川主破裂带的断层倾角沿走向由南往北逐渐变大,与前人对该断裂带产状的认识相一致.

(2)映秀—北川主破裂带的南段,特别是在发震断层的起始段,断层的错动以逆冲为主,而北川以北走滑明显大于逆冲.这一破裂特征与上面提到的断层产状相一致,即低角度断层有利于逆冲破裂,而高角度断层有利于走滑破裂.

(3)地表破坏最为严重、人员伤亡最为惨烈的映秀和北川地区恰好对应错动量最大的断层段:映秀附近逆冲分量达 $7.5$  m,北川附近走滑和逆冲分量分别达 $4.9$  m和 $5.5$  m.

(4)本次地震释放的标量地震矩为 $6.70 \times 10^{20}$  N·m,相应的矩震级 $M_w = 7.9$ ,与前人根据远震地震波资料得到的结果相一致.

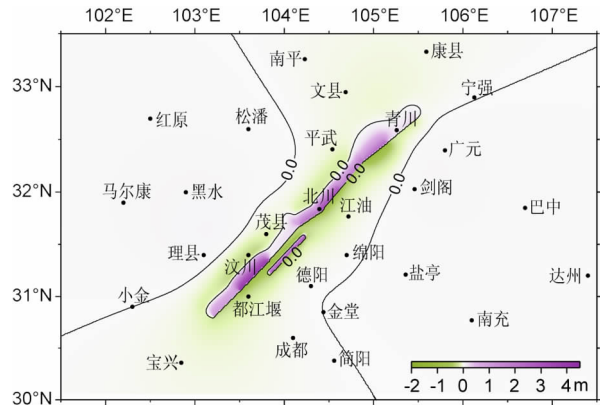


图4 模型计算的地表垂直位移

Fig. 4 Surface vertical displacement predicted by coseismic rupture model

(5)同震破裂造成的位移场在断层两侧呈非对称分布,上盘大于下盘.由此造成的应力场扰动在两盘也应有所不同.结合同震和震后形变场研究将有助于认识本区域应力应变场的演化、断层与介质流变学性质、凹凸体的分布及后期地震危险性.

**致谢** 感谢中国地震局地震研究所王琪研究员提供了部分 GPS 点的同震位移观测数据.在本文的研究过程中,沈正康教授、张培震研究员给予了很多建设性的意见,特此表示感谢.另外感谢两位评阅专家提出的宝贵意见.

## 参考文献 (References)

- [1] 邓起东,冉永康,杨晓平等.中国活动构造图.北京:地震出版社,2007  
Deng Q D, Ran Y K, Yang X P, et al. Map of Active Tectonic in China (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2007
- [2] Burchfiel B C, Royden L H, Van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 2008, **18**(7), doi:10.1130/GSATG18A.1
- [3] 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
- [4] Ji C. Preliminary result of the May 12, 2008  $M_w 7.9$  ShiChuan Earthquake [http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big\\_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html), 2008
- [5] 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. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>  
Chen Y T, Xu L S, Zhang Y, et al. Analysis report on focal characteristics of the Wenchuan strong earthquake on May

- 12, 2008 (in Chinese). <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>
- [6] 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  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1403~1410
- [7] 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. GPS 测定的 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 级地震的同震位移场. 中国科学(D 辑), 2008, **38**(10): 1195~1206  
The Project of Crustal Movement Observation Network of China. The coseismic displacement fields of Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake occurrence in 2008 using GPS data. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2008, **38**(10): 1195~1206
- [8] 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 汶川  $M_s$ 8.0 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  $M_s$ 8.0 earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 390~397
- [9] Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1985, **75**: 1135~1154
- [10] Shen Z-K, Jackson D. GPS reoccupation of early triangulation sites: tectonic deformation of the Southern Coast Ranges. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**: 9931~9946
- [11] 王闯昭, 王恩宁, 沈正康等. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率. 中国科学(D 辑), 2008, **38**(5): 582~597  
Wang Y Z, Wang E N, Shen Z-K, et al. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China (Series D)*, 2008, **51**(9): 1267~1283
- [12] 徐锡伟, 张培震, 闻学泽等. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型. 地震地质, 2005, **27**(3): 446~461  
Xu G W, Zhang P Z, Wen X Z, et al. Features of active tectonics and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan province and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2005, **27**(3): 446~461
- [13] 易桂喜, 闻学泽, 王思维等. 由地震活动参数分析龙门山—岷山断裂带的现今活动习性与强震危险性. 中国地震, 2006, **22**(2): 117~125  
Yi X G, Wen X Z, Wang S W, et al. Study on fault sliding behaviors and strong-earthquake risk of the Longmenshan-Minshan fault zones from current seismicity parameters. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2006, **22**(2): 117~125
- [14] <http://www.csi.ac.cn> China Earthquake Networks Center. <http://www.csi.ac.cn>
- [15] USGS, Magnitude 7.9-EASTERN SICHUAN, China, <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan>
- [16] Harvard University, USA, <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- [17] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部构造与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4): 348~355  
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2008, **35**(4): 348~355
- [18] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等. 2008 年汶川 8.0 级地震震源断裂的滑动速率、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 Longmenshan 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
- [19] 刘启元, 李 昱, 陈九辉等. 汶川  $M_s$ 8.0 地震: 地壳上地幔 S 波速度结构的初步研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 309~319  
Liu Q Y, Li Y, Chen J H, et al. Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake: preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 309~319
- [20] 王椿镛, Mooney W D, 王溪莉等. 川滇地区地壳上地幔三维速度结构研究. 地震学报, 2002, **24**(1): 1~16  
Wang C Y, Mooney W D, Wang X L, et al. A study on 3-D velocity structure of crust and upper mantle in Sichuan-Yunnan region, China. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, **15**(1): 1~17
- [21] 楼 海, 王椿镛, 吕智勇等. 2008 年汶川  $M_s$ 8.0 级地震的深部构造环境—远震 P 波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学(D 辑), 2008, **38**(10): 1207~1220  
Lou H, Wang C Y, Lü Z Y, et al. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake in southwestern China—Joint analysis of teleseismic P-wave receiver functions and Bouguer gravity anomalies. *Science in China (Series D)*, 2009, **52**(2): 166~179
- [22] 杨海燕, 胡家富, 赵 宏等. 川西地区壳幔结构与汶川  $M_s$ 8.0 级地震的孕育背景. 地球物理学报, 2009, **52**(2): 356~364  
Yang H Y, Hu J F, Zhao H, et al. Crust-mantle structure and seismogenic background of Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake in Wenchuan Sichuan area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2): 356~364
- [23] 黄 媛, 吴建平, 张天中等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究. 中国科学(D 辑), 2008, **38**(10): 1242~1249  
Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China (Series D)*, 2008, **51**(12): 1703~1711
- [24] Kanamori H. The energy release in great earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1997, **82**(20): 2981~2987
- [25] 孙建宝, 梁 芳, 沈正康等. 汶川  $M_s$ 8.0 级地震 InSAR 形变观测及初步分析. 地震地质, 2008, **30**(3): 789~794  
Sun J B, Liang F, Shen Z-K, et al. InSAR deformation observation and preliminary analysis of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**

(3):789~794

[26] Plafker G. Tectonic deformation associated with the 1964 Alaska earthquake. *Science*, 1965, **148**:1675~1687

[27] Shen Z-K, Ge X, Jackson D, et al. Northridge earthquake rupture models based on the global Positioning System

measurements. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 1996, **86**(1B):S37~S48

[28] Vigny C, Simons W J F, Abu S, et al. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature*, 2005, **436**(7048):201~206

(本文编辑 胡素芳)

## 欢迎订阅《地球物理学报》

《地球物理学报》创刊于 1948 年,是中国科学院地质与地球物理研究所、中国地球物理学会联合主办的有关地球物理科学的综合性学术刊物. 主要刊载固体地球物理、应用地球物理、地磁和空间物理、大气和海洋地球物理,以及与地球物理密切相关的交叉学科研究成果的高质量论文. SCI 等国际著名检索系统收录,国内外公开发行人. 2010 年《地球物理学报》为月刊,每期定价 70 元,全年定价 840 元(含邮资). 国内邮发代号 2-571. 也可直接从编辑部订购,保证快捷准时.

订阅地址:北京 9825 信箱《地球物理学报》编辑部 邮编:100029

电话:010-82998105 传真:010-82998107

电子邮件:prog@mail.igcas.ac.cn xtq@mail.igcas.ac.cn

联系人:刘少华 肖台琴

开户行:中国农业银行北京健德支行

银行帐号:190901040000456

收款单位:中国科学院地质与地球物理研究所

(务必在注释行写上:购《地球物理学报》款,同时写上您的姓名和联系地址及发票单位)