

# 近场强震记录对汶川地震破裂过程的解释能力研究\*

尹得余<sup>1</sup>, 刘启方<sup>2</sup>, 董云<sup>1</sup>, 余跃心<sup>1</sup>, 武精科<sup>1</sup>, 程永振<sup>1</sup>, 张继华<sup>1</sup>, 陈家瑞<sup>1</sup>

(1. 淮阴工学院 建筑工程学院, 江苏 淮安 223001; 2. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215000)

**摘要:** 选用方位角覆盖较均匀的43个近场强震记录, 通过基线校正、积分和滤波后得到速度时程。采用非负最小二乘法和多时间视窗技术, 反演了2008年汶川地震破裂过程。研究表明: ①所选43个近场台站记录对近乎平行的北川断层南段和彭灌断层的滑动分辨能力不同, 所选记录能很好地分辨北川断层南段的滑动, 而对彭灌断层的滑动分辨能力要差; ②为满足破裂后方区域台站合成记录的第二个波包, 北川断层南段或彭灌断层需产生往破裂后方西南侧方向的破裂。综合考虑波形拟合残差及反演结果与地表破裂数据的吻合情况, 得到可能的破裂顺序: 破裂起始于北川断层南段深部低倾角位置, 接着引起彭灌断层破裂, 进而引起小鱼洞断层破裂, 小鱼洞断层触发北川断层南段高倾角区域发生双侧破裂。

**关键词:** 汶川地震; 近场强震记录; 破裂过程反演; 破裂顺序; 小鱼洞断层

**中图分类号:** P315.91

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)04-0616-11

## 0 引言

2008年汶川大地震造成了大量人员伤亡和非常严重的工程震害, 成为业内研究的热点, 促进了对大地震震源物理特性的认识。汶川地震发生在龙门山断裂带, 发震断层呈叠瓦状, 破裂过程复杂。地震沿龙门山断裂带的前山断裂和中央断裂形成灌县江油断裂(彭灌断层)以及北川映秀断裂(北川断层), 并产生近乎平行的地表破裂, 长约72 km和240 km(徐锡伟等, 2008, 2010; 邓起东等, 2011)。震源破裂过程研究表明: 破裂从震中往东北侧扩展, 断层面上滑动形式变化明显(王卫民等, 2008; 张勇等, 2008; Shen等, 2009; Hartzell *et al.*, 2013; 尹得余, 2017; 赵静等, 2018)。北川断层南段(高川以南)为逆冲错动, 经高川后出现走滑错动, 南坝以北转变为走滑错动为主。高川两侧余震震源机制不同, 高川以北表现为高倾角的特点(胡幸平等, 2008), 且高川以北余震分布的宽度明显窄于高川以南(黄

媛等, 2008; 朱艾澜等, 2008; 陈九辉等, 2009), 表明北川断层北段倾角大于南段。余震震中约呈直线分布, 说明断层走向无变化, 滑动方向或倾角可能不同。此外, 震中东北侧45 km处有一条长约6 km的小鱼洞破裂带, 其垂直于北川断层和彭灌断层(邓起东等, 2011)。目前, 针对汶川地震震源破裂过程反演的研究, 大都忽略了小鱼洞断层在破裂扩展中的作用。从地表破裂调查和余震震源机制的角度看, 断层破裂在小鱼洞断层处可能发生了重要的转换。一方面, 北川映秀断裂和灌县江油断裂的地表破裂在小鱼洞断层两侧出现了错位和不连续; 另一方面, 小鱼洞断裂带上余震震源机制为左旋走滑, 而北川断层南段余震为逆冲。研究人员已从断层构造或运动学角度探析小鱼洞断层的作用(Hartzell *et al.*, 2013; 贺鹏超, 沈正康, 2014; 王鹏, 刘静, 2014; 尹得余等, 2018), 但此问题仍有待进一步探讨。

本文选取近场丰富强震记录, 将其积分为速度记录作为反演数据。一方面, 速度时程是加速度时程积分一次得到, 记录本身的误差相比积分2

\* 收稿日期: 2019-06-21.

**基金项目:** 江苏省住建厅项目“大型城市水下盾构隧道结构安全性研究”(Z413B18329)、混凝土结构抗震侵蚀性能提升关键研发(2018ZP045)、基于BZM技术的装配式建筑施工组织与协同管理机制研究(2018ZD154)、国家自然科学基金“沿空留巷厚层软弱顶板采动裂隙分形特征及注浆扩散规律研究”(51804129)和淮安市自然科学基金项目“透水混凝土的水-泥-沙混合流体渗流特性研究”(HAB201708)联合资助。

次的位移资料小，确保反演数据的可靠。另一方面，相对于远场地震观测（速度）记录，近场强震记录包含更多的高频信息，揭示破裂的细节部分。探究近场强震记录重现此次大震震源破裂过程的能力，探讨小鱼洞断层在破裂中的作用，分析近场强震记录对近乎平行的北川断层和彭灌断层滑动分布的解释能力。

### 1 数据的选取处理和模型参数

本文所用近场强震数据从中国地震局工程力学研究所的国家强震动台网中心获得，参与反演的记录波形质量要完整且信噪比要高，台站能较均匀地分布在断层四周。挑选波形完整且质量较好、较均匀分布在断层周边的 43 个台站加速度记录。基线校正后积分为速度记录，采用 3 阶 Butterworth 带通无相移滤波，频带 0.08 ~ 0.5 Hz。记录长度 120 s，间隔 0.2 s，包括 P 波、S 波和面波，台站位置见图 1。破裂后方区域台站记录对确定断层间的破裂顺序至关重要，在此作简要分析。破裂后方位于断层东南侧区域共 11 个台站。此区域台站记录明显特征为，加速度和速度波形包含 2 个波段。第一个波段起始于 P 波到时，持续 15 s 左右，约从 15 s 到 30 s；紧接着为第二个波段，约从 30 s 到 55 s，持续 25 s（图 2）。

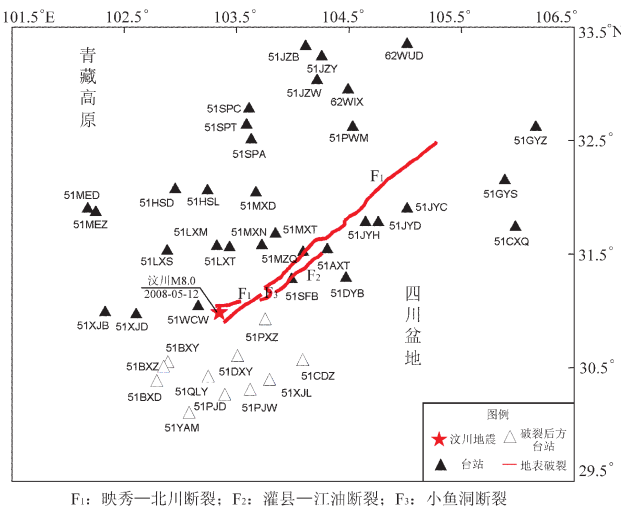


图 1 汶川地震地表破裂、震中和所选台站位置  
Fig. 1 The locations of surface rupture, epicenter and stations used in this study of the Wenchuan earthquake

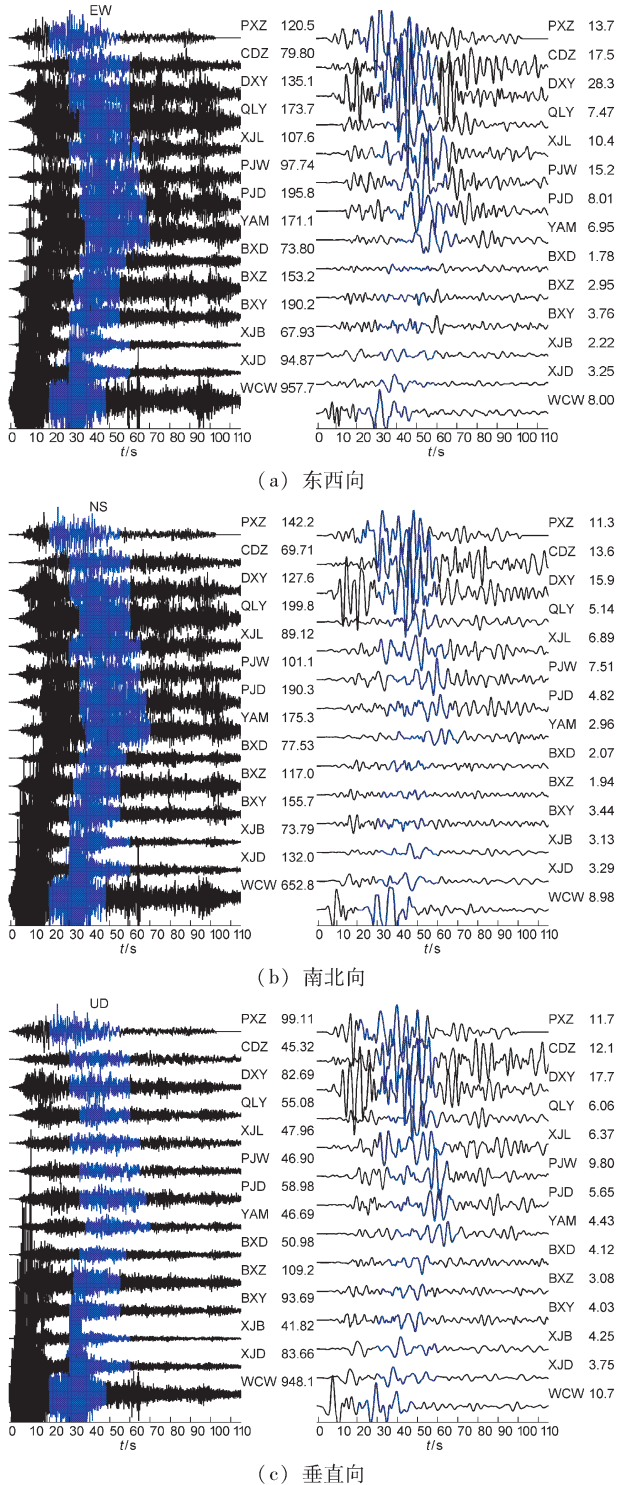


图 2 破裂后方 11 个台站三分向加速度和速度记录（蓝线为第 2 个波段，字母和数字台站和记录最大值）

Fig. 2 Three - component acceleration and velocity records of 11 stations are located behind the rupture direction. (Blue lines denote the second wave packet, letters and numbers denote stations and the maximum value of records)

记录到时校正的准确性对反演结果影响较大,做如下校核确保记录到时准确。由汶川地震发震时刻对应的绝对时刻和台站 P 波理论到时,可得理论到时对应的绝对时刻;由记录触发时刻对应的绝对时刻和人工捡拾 P 波到时,可得人工捡拾 P 波到时对应的绝对时刻;分析二者的差别,绝大多数台站 2 个时刻的差别在 1 个时间视窗的宽度内 (2.0 s),由此认为到时的误差对反演结果影响较小 (Wu *et al*, 2001)。

笔者基于汶川地震三维发震构造模型、地表破裂调查结果和余震震中分布尺度 (徐锡伟等, 2008; Hubbard *et al*, 2009, 2010; Zhang *et al*, 2010),建立了三维曲面断层模型,包含北川断层和彭灌断层 (图 3)。北川断层分南北 2 段,以高川为界。北川断层南段包含 4 段,倾角由深到浅逐渐增大,依次为 20°、33°、50°和 65°,分别记为北川断层 4、北川断层 3、北川断层 2

和北川断层 1,沿倾向包含 5, 4, 2, 2 个子断层;北川断层北段为北川断层 5,倾角 60°;彭灌断层倾角 33°,与北川断层 3 倾角相同;断层尺寸如表 1 所示。子断层沿走向和倾向取 5 km 和 3 km,模型共包含 854 个子断层。

表 1 断层参数

Tab. 1 The parameters of fault model

断层	倾角/ (°)	断层长/ km	断层宽/ km	子断层沿 走向个数	子断层沿 倾向个数	子断层 个数
彭灌断层	33	132	18.4	26	6	156
北川断层 1	65	132	6	26	2	52
北川断层 2	50	132	6	26	2	52
北川断层 3	33	132	12	26	4	104
北川断层 4	20	132	15	26	5	130
北川断层 5	60	180	30	36	10	360

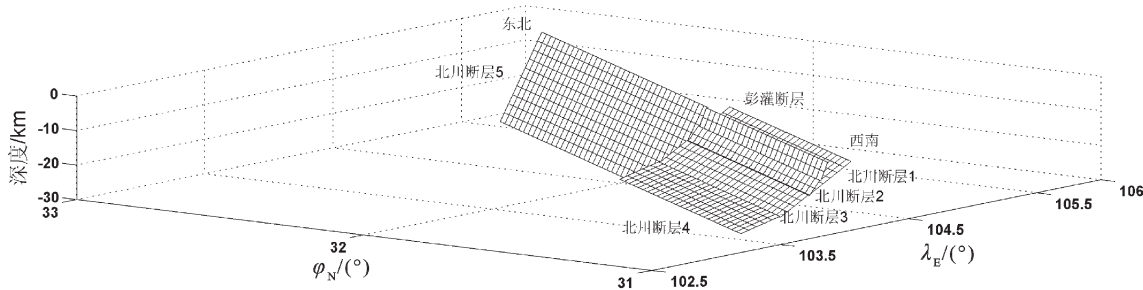


图 3 汶川地震三维曲面断层模型

Fig. 3 The 3D curved fault model of the Wenchuan earthquake

2 断层破裂方式

汶川地震发震深度 14 km,位于北川断层 3 上。已有研究探讨了汶川地震断层间的破裂顺序,但尚无统一结论 (陈桂华等, 2009; 钱琦, 韩竹军, 2010; Hartzell *et al*, 2013; 贺鹏超, 沈正康, 2014; 王鹏, 刘静, 2014)。由此,本文采用 3 种破裂方式,探讨北川断层、彭灌断层和小鱼洞断层之间可能的破裂顺序。①方式 1:北川断层和彭灌断层都发生单侧破裂。破裂起始于北川断层 3,向深度方向破裂触发北川断层 4,向浅部同时触发北川断层 2 和彭灌断层,随后北川断层 2 触发其上部的北川断层 1。②方式 2:北川断层发生双侧破裂。北川断层 3 首先破裂,向深度触发北川断层 4,向浅部只触发彭灌断层,

彭灌断层破裂往北扩展引起小鱼洞断层破裂,进而触发北川断层 1,随后北川断层 1 和北川断层 2 从与小鱼洞断层相交处发生双侧破裂。③方式 3:彭灌断层发生双侧破裂。北川断层 3 首先破裂,向深度触发北川断层 4,向浅处扩展依次触发北川断层 2 和北川断层 1;北川断层 1 破裂往北侧扩展触发小鱼洞断层,进而触发彭灌断层,随后彭灌断层以与小鱼洞断层相交处为中心发生双侧破裂。3 种破裂方式中,北川断层 5 均由北川断层 3 往北侧破裂触发。

3 近场记录对 2 条平行断层滑动的分辨能力

利用非负最小二乘法反演断层滑动历程,具体细节参考 Hartzell 和 Heaton (1983) 的研究。滑

动时间函数形式为等腰三角形，持时 2.0 s，子断层包含 5 个时间视窗，相邻视窗破裂延时 2.0 s，子断层最大上升时间 10 s。龙门山断裂带两侧的青藏高原和四川盆地厚度和介质速度构造不同，选用 Hartzell 等（2013）采用的结果，建立一维地壳速度模型（表 2），破裂速度取 3.0 km/s（尹得余，2017）。

汶川地震一个重要特点是产生 2 条近乎平行的断层：北川断层和彭灌断层。为探析近场记录对二

者滑动的分辨能力，设定 2 个算例。根据震源破裂过程反演结果，设定算例 1 为北川断层南段 1 和 2 的龙门山到岳家山区域、映秀到虹口区域，算例 2 彭灌断层从与小鱼洞断层相交处到汉旺区域，发生滑动，滑动角 135°，子断层上升时间 10 s，参数见表 3，采用破裂方式 2。计算模型在 43 个台站的理论记录，将最大值为理论记录最大值 10% 的白噪声加入作为目标记录，并将记录带通滤波，频带 0.08 ~0.5 Hz，反演结果如表 3 和图 4、5 所示。

表 2 一维地壳速度模型  
Tab. 2 1D crustal velocity model

四川盆地(下盘)						青藏高原(上盘)					
$V_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{ml}^{-3})$	厚度/m	$Q_p$	$Q_s$	$V_p/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$V_s/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{ml}^{-3})$	厚度/m	$Q_p$	$Q_s$
4.8	2.7	2.2	6	200	100	6.0	3.4	2.4	10	600	300
6.0	3.4	2.4	4	600	300	6.2	3.5	2.6	15	600	300
6.2	3.5	2.6	15	600	300	5.9	3.1	2.6	20	600	300
6.6	3.8	2.8	15	600	300	6.6	3.8	2.8	10	600	300
8.08	4.47	3.37	—	800	400	8.08	4.47	3.37	—	800	400

表 3 算例 1 和 2 中输入模型参数和反演结果  
Tab. 3 Parameters of input models and inversion results of examples 1 and 2

算例		彭灌断层			北川断层南段		
		最大滑动量/m	地震矩/( $10^{21}\text{N}\cdot\text{m}$ )	比重(%)	最大滑动量/m	地震矩/( $10^{21}\text{N}\cdot\text{m}$ )	比重(%)
1	输入	—	—	—	10.0	0.140	100
	结果	1.9	0.012	8	11.0	0.142	92
2	输入	10.0	0.138	100	—	—	—
	结果	9.0	0.097	65	2.7	0.052	35

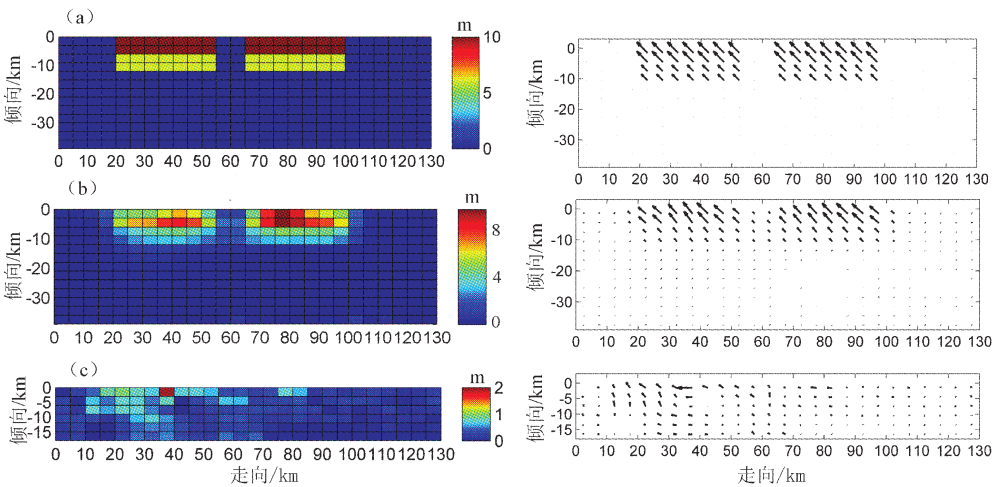


图 4 算例 1 结果输入模型 (a)，北川断层南段结果 (b) 和彭灌断层结果 (c)  
Fig. 4 The result of example 1. input model (a), result of south Beichuan fault (b), result of Pengguan fault (c)

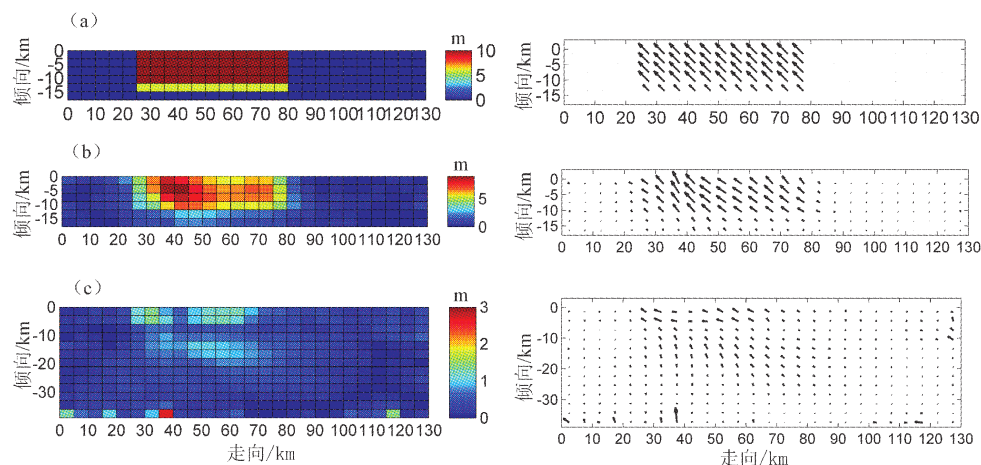


图5 算例2结果输入模型 (a), 彭灌断层结果 (b) 和北川断层南段结果 (c)

Fig.5 The result of example 2. input model (a), result of Pengguan fault (b), result of south Beichuan fault (c)

分析算例1得到: 北川断层南段高倾角的滑动, 绝大部分位于输入模型的相应位置, 很少分配到彭灌断层上; 北川断层南段地震矩占92%, 彭灌断层地震矩仅占8%。算例2结果表明, 彭灌断层上的滑动部分仍位于输入模型的相应位置, 一部分转移到北川断层南段上; 彭灌断层地震矩占65%; 北川断层南段地震矩占35%。

算例结果说明: 所选43个近场台站对北川断层南段的滑动有很好的分辨能力, 而对彭灌断层上的滑动分辨能力要差一些。由台站分布位置可以看出, 断层上盘北川断层南段区域台站的数量明显多于彭灌断层下侧下盘区域的台站。台站分布的位置可能导致对2个断层滑动分辨能力的差异。

## 4 反演结果

采用本文建立的3维曲面断层模型, 由并行非负最小二乘法联合多时间视窗技术, 得到3种破裂方式结果如表4和图6所示。结果表明, 近场记录得到的位错分布复杂且分散。方式1, 2和3地震矩分别为  $1.106 \times 10^{21}$ ,  $1.112 \times 10^{21}$ ,  $1.138 \times 10^{21}$  N·m。波形拟合残差分别为: 0.492, 0.459和0.458, 方式2和3接近, 方式1比方式2和3大7%。北川断层南段位错大体集中分布在3个区域。方式1, 2和3中, 第1个区域在初始破裂点周边, 为逆冲兼走滑错动; 第2个区域在低倾角的北川断层3和4上, 从断层中间一直延伸到东北端, 总体

上为逆冲兼右旋走滑。方式1和3时, 第3个区域在高倾角的北川断层1和2从岳家山到虹口区域内, 主要表现为逆冲错动; 方式2时, 第3个区域的位置不同于方式1和3, 位于高倾角的北川断层1和2上, 从龙门山区域一直延伸到断层的西南端, 主要为逆冲错动。3种方式, 彭灌断层上位错主要集中在断层中间到东北端范围内, 总体以逆冲错动为主。方式3时, 断层西南段有一定量的位错分布。相比北川断层南段和彭灌断层, 北川断层北段的位错分布区域更广, 3种破裂方式结果相似。Wu等(2001)测试1999年集集地震震源反演结果对近场上盘和下盘区域台站的敏感性, 得到单独采用台站方位角覆盖更广的上盘台站, 结果更接近最终位错分布的结论, 因此近场台站方位角分布情况对反演结果影响较大。汶川地震近场台站分布有如下特点: 北川断层南段周边台站数量较多, 较均匀分布有28个台站; 且有一定量的近断层台站, 例如51AXT, 51MZQ, 51PXZ, 51SFB和51WCW。而北川断层北段周边只有15个台站, 缺乏近断层台站, 且南坝以北无近断层台站。台站数量和位置分布情况可能导致北川断层北段上位错分布可靠性低于南段。Hartzell等(2007)利用54个近场强震台站记录很好重现了2004年美国Parkfield 6.0地震滑动过程, 此次地震发震断层约50 km。而汶川地震300 km左右破裂尺度只有近场约40台站限定反演结果, 近场台站的数目不足。

表4 3种破裂方式断层面上地震矩和最大位错  
Tab. 4 The maximum slip values and moment of three rupture modes

方式	彭灌		北川1		北川2		北川3		北川4		北川5		总和	
	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	最大位错/m	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	地震矩/ $(10^{21}\text{N}\cdot\text{m})$	残差
1	7.1	0.143	5.1	0.043	4.8	0.040	8.0	0.096	8.2	0.172	8.7	0.612	1.106	0.492
2	7.6	0.142	4.5	0.050	6.8	0.067	8.7	0.097	7.2	0.157	9.3	0.600	1.112	0.459
3	7.5	0.155	4.6	0.043	7.9	0.055	8.5	0.116	8.7	0.177	10.3	0.592	1.138	0.458

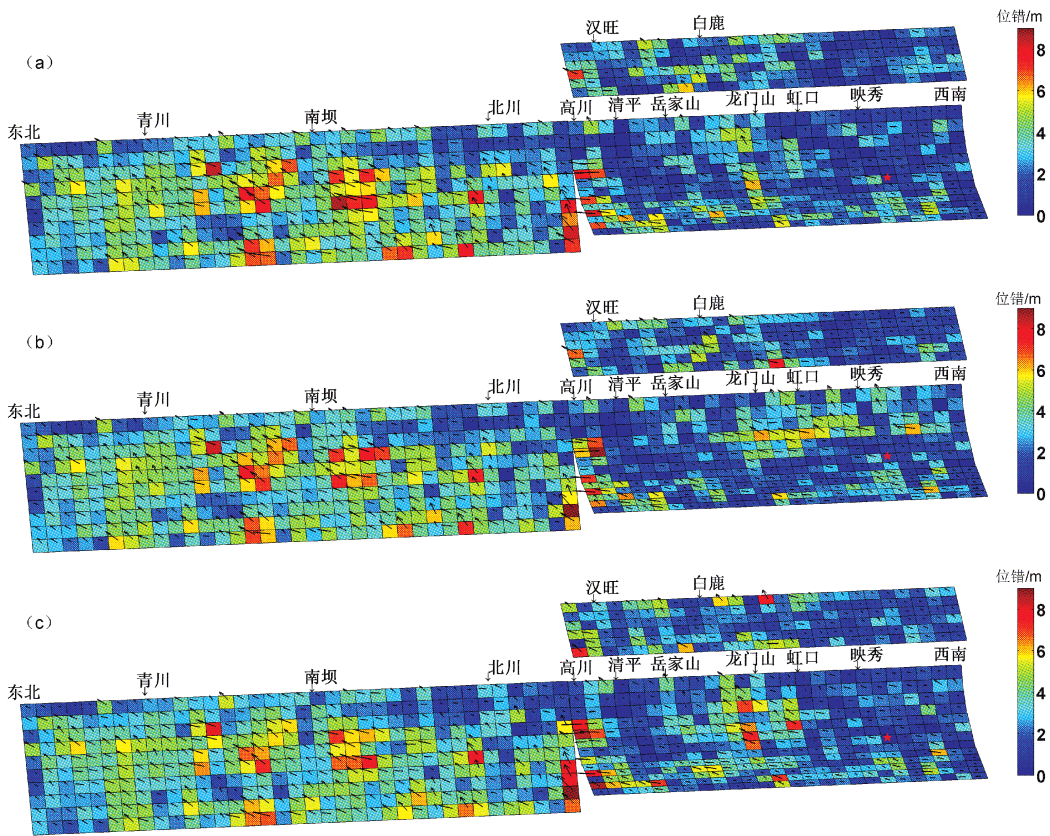
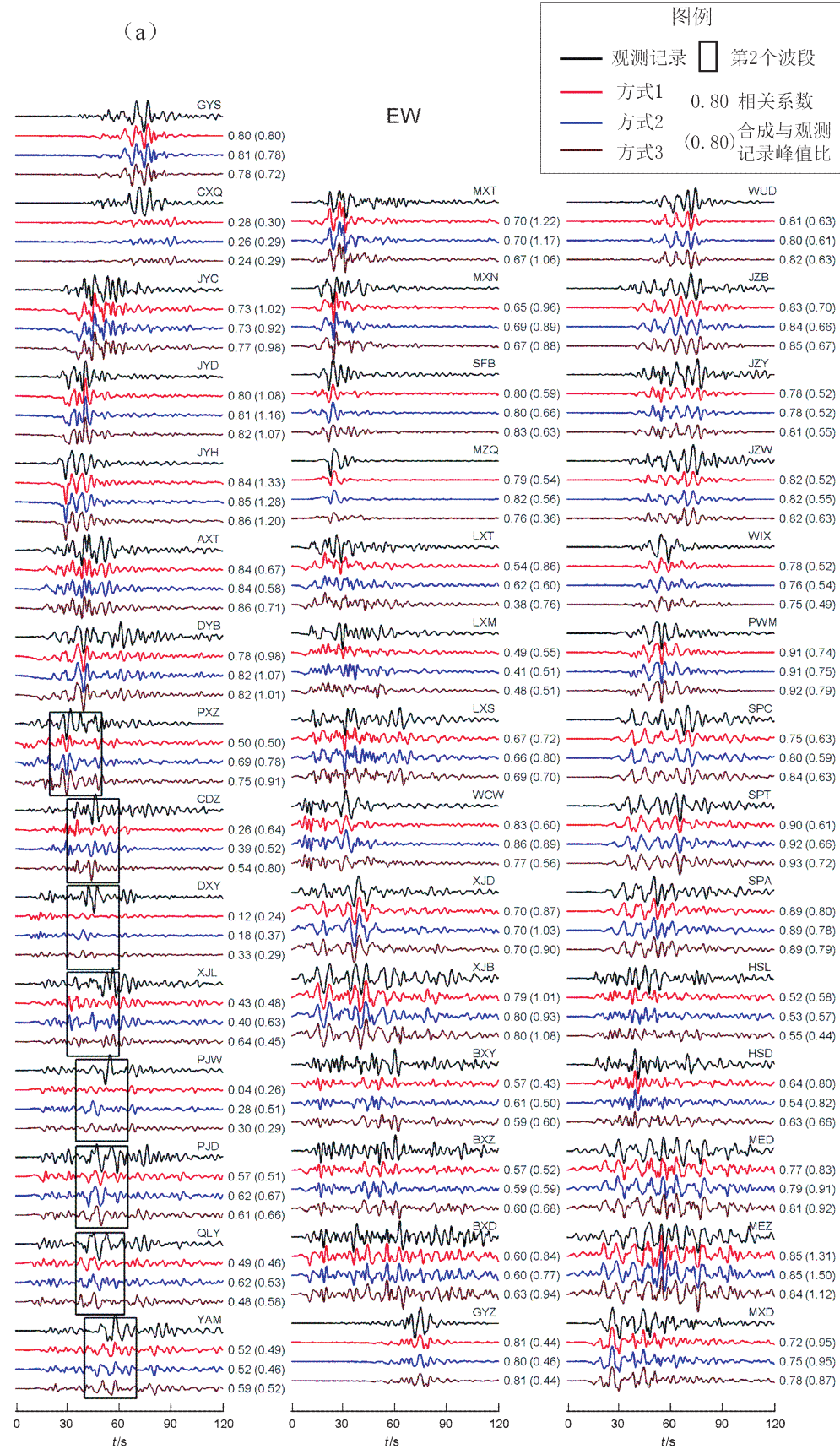


图6 破裂方式1 (a)、2 (b) 和3 (c) 断层面滑动量和滑动方向分布  
Fig. 6 Slip value and direction of rupture mode for 1 (a), 2 (b) and 3 (c)

3种方式，大部分台站合成记录的幅值和相位信息与观测记录符合较好（图7），在此重点分析破裂后方区域11个台站。总体看，方式1，2和3，合成记录幅值普遍小于观测记录。南北和垂直向合成记录情况好于东西向，可能由于台站三分向记录受盆地的影响，此区域位于四川盆地内（于彦彦，2016）。位于下盘的台站，采用方式2和3时，51CDZ，51PXZ，51QLY，51XJL和51YAM合成记录第2个波段的幅值大于方式1，更接近观测记录，而方式1的幅值远小于观测记录。51DXY，51PJD和51PJW台站第2个波段的后

半部分，3种方式合成记录幅值都比观测记录小，但方式2和3的波形更接近观测记录。而位于上盘的3个台站51BXD，51BXY和51BXZ，3种方式合成记录相似，但幅值偏低。破裂后方台站合成记录与观测记录的对比表明，发生双侧破裂的方式2和3合成记录的效果优于方式1，合成记录的第2个波段的幅值和相位信息更接近观测记录，且方式1波形拟合残差比方式2和3大。因此，为了使破裂后方区域台站合成记录的第2个波段符合观测记录，北川断层或彭灌断层需有破裂反向扩展，这可能与汶川地震复杂的发震构造有关，北川断层、





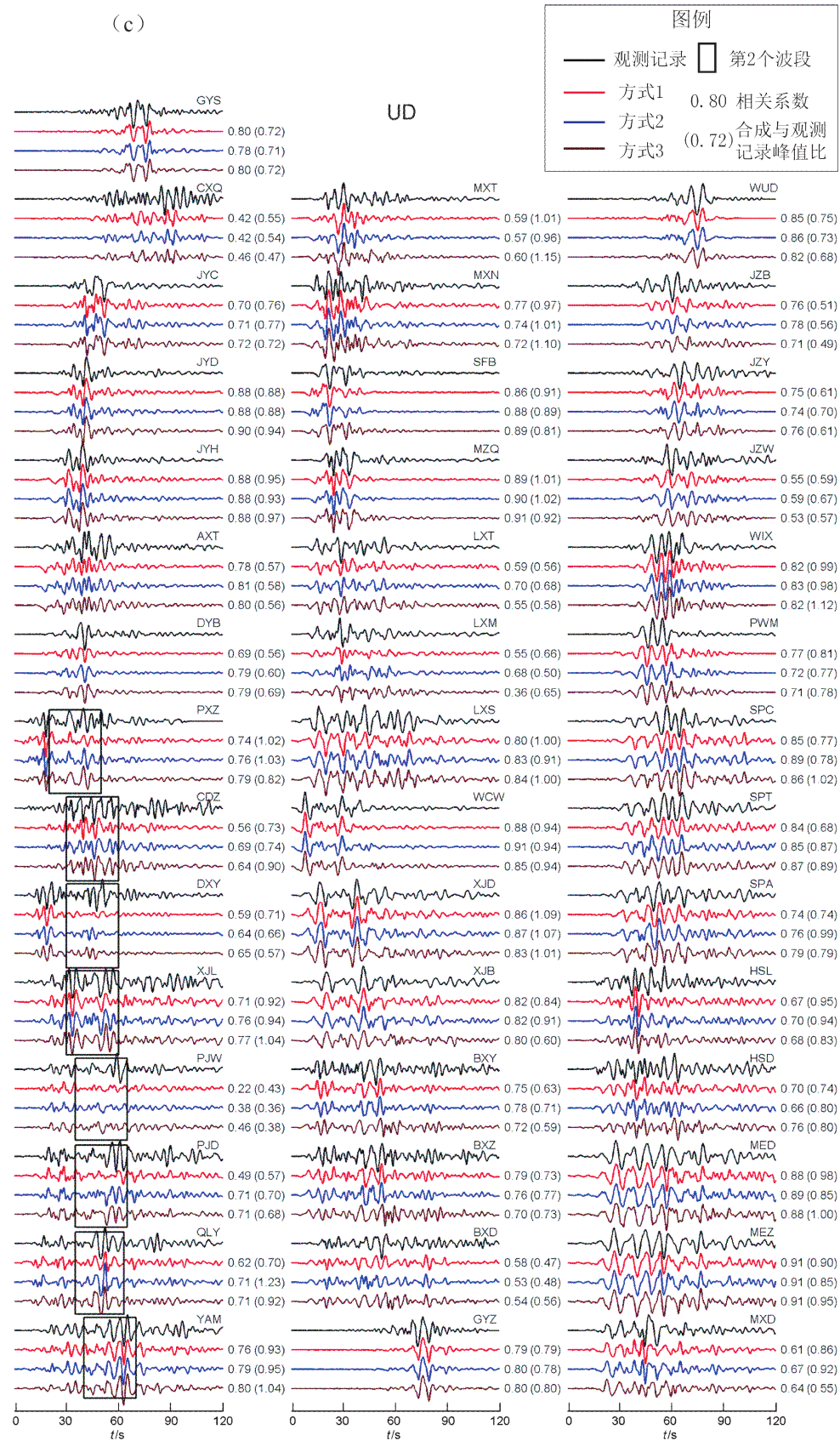


图 7 破裂方式 1, 2 和 3 东西 (a)、南北 (b) 和垂直向 (c) 合成速度记录与观测速度记录比较  
Fig. 7 Comparison of synthetic and observed waveforms for EW (a), NS (b) and UD (c)  
of rupture modes 1, 2 and 3

彭灌断层在与小鱼洞断层相交处存在几何关系复杂的断裂体系（王鹏，刘静，2014），这进一步表明汶川地震破裂的复杂性。Hartzell 等（2013）联合近场记录、远场记录和 GPS 资料得到，北川断层南段在与小鱼洞断层相交处发生了双侧破裂。从本文结果看，单独近场记录反演结果也表明存在双侧破裂。对于破裂方式 2 和 3，波形拟合残差相近，位错分布的差异表现在高倾角的北川断层 1 和 2 以及彭灌断层上。高倾角的北川断层 1 和 2 在虹口以南区域，采用破裂方式 2 有位错分布，且近地表子断层也发生错动；采用方式 3 位时错很小。彭灌断层南半段，采用方式 2 时，近地表子断层滑动很小；采用方式 3 时近地表子断层有一定的滑动。地表破裂调查结果表明，虹口以南存在地表破裂，而彭灌断层西南段无地表破裂。所以，方式 2 结果与地表破裂调查更符合。综合波形拟合残差以及与地表破裂数据符合的程度，破裂方式 2 的结果最优。

## 5 结论

本文采用近场强震记录，重现汶川地震破裂过程。探讨了近场记录对此次地震滑动的分辨能力，得到如下结论：

（1）台站分布和数量对近场记录反演结果的可靠性影响较大。汶川地震北川断层西南段近场台站覆盖较均匀，东北段台站少且覆盖范围有限，北川断层北段的滑动不可靠，需要联合其它资料共同约束。单独近场强震数据反演的汶川地震滑动分布，与远场长周期资料和联合不同数据反演结果相差较大。汶川地震发震构造复杂，基于简单速度构造得到的格林函数不能充分反应真实传播路径的影响，这导致了近场强震资料反演结果与其它资料结果的差异。

（2）近场记录的空间分辨率要优于远场记录，同一断层面，近场格林函数沿走向和倾向都有明显的变化，这有助于揭示断层破裂的细节。本文所用 43 个近场台站记录对近乎平行的北川断层南段和彭灌断层的滑动识别能力不同，所选记录可分辨北川断层南段的滑动，但对彭灌断层的滑动分辨能力要差。为了满足位于破裂后方台站合成记录的第 2 个波段，北川断层南段需产生往破裂后

方的扩展，而基于远场资料的反演结果不能反映。所以，可靠震源破裂过程反演结果需要联合多种资料。

感谢中国地震局工程力学研究所“国家强震自动台网中心”为本研究提供数据支持，感谢两位审稿专家的修改意见和建议。

## 参考文献：

- 陈桂华, 徐锡伟, 于贵华, 等. 2009. 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震多断层破裂的近地表同震滑移及滑移分解[J]. 地球物理学报, 52(5): 1384 - 1394.
- 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等. 2009. 汶川  $M_s8.0$  地震余震序列重新定位及其地震构造研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 390 - 397.
- 邓起东, 陈桂华, 朱艾澜. 2011. 关于 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震震源断裂破裂机制几个问题的讨论[J]. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1559 - 1576.
- 贺鹏超, 沈正康. 2014. 汶川地震发震断层破裂触发过程[J]. 地球物理学报, 57(10): 3308 - 3317.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 等. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报, 51(6): 1711 - 1718.
- 黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重新定位研究[J]. 中国科学: 地球科学, 38(10): 1242 - 1249.
- 钱琦, 韩竹军. 2010. 汶川  $M_s8.0$  级地震断层间相互作用及其对起始破裂段的启示[J]. 地学前缘, 17(5): 84 - 92.
- 王鹏, 刘静. 2014. 断层横向构造在逆冲型地震破裂中的作用 - 以汶川地震小鱼洞断层为例[J]. 地球物理学报, 57(10): 3296 - 3307.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 51(5): 1403 - 1410.
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 2010. 2008. 5. 12 汶川地震地表破裂基本参数的再论证及其构造内涵分析[J]. 地球物理学报, 53(10): 2321 - 2336.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 2008. 汶川  $M_s8.0$  地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597 - 629.
- 尹得余, 刘启方, 刘畅, 等. 2018. 基于近场强震记录 and 同震位移的汶川地震破裂过程[J]. 地震地质, 40(3): 698 - 717.
- 尹得余. 2017. 汶川地震破裂过程联合反演及高频辐射研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 于彦彦. 2016. 三维沉积盆地地震效应研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所.
- 张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学: 地球科学, 38(10): 1186 - 1194.
- 赵静, 任金卫, 江在森, 等. 2018. 龙门山断裂西南断闭锁与变形特征[J]. 地震研究, 41(2): 216 - 225.
- 朱艾澜, 徐锡伟, 刁桂苓, 等. 2008. 汶川  $M_s8.0$  地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质, 30(3): 759 - 767.
- Hartzell S H, Heaton T H. 1983. Inversion of strong ground motion and teleseismic waveform data for the fault rupture history of the 1979

- Imperial Valley, California, earthquake[J]. Bull. Seismol. Soc. Am, 73(6):1553 – 1583.
- Hartzell S, Liu P C, Mendoza C, *et al.* 2007. Stability and uncertainty of finite – fault slip inversions; application to the 2004 Parkfield, California, Earthquake[J]. Bull Seismol Soc Amer, 97(6):1911 – 1934.
- Hartzell S, Mendoza C, Ramirez – Guzman L, *et al.* 2013. Rupture History of the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan, China, Earthquake; Evaluation of Separate and Joint Inversions of Geodetic, Teleseismic, and Strong – Motion Data[J]. Bull Seismol Soc Amer, 103(1):353 – 370.
- Hubbard J, Shaw J H, Klinger Y. 2010. Structural Setting of the 2008  $M_w$ 7.9 Wenchuan, China, Earthquake[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5B):2713 – 2735.
- Hubbard J, Shaw J H. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ( $M$ 7.9) earthquake[J]. Nature, 458(7235):194.
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, *et al.* 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Nature geosciences, 2(10):718 – 724.
- Wu C C, Dreger D, Kaverina A. 2001. Finite – Source Modeling of the 1999 Taiwan (Chi – Chi) Earthquake Derived from a Dense Strong – Motion Network[J]. Bull Seismol Soc Amer, 91(5):1144 – 1157.
- Zhang P Z, Wen X Z, Shen Z K, *et al.* 2010. Oblique, High – Angle, Lixtric – Reverse Faulting and Associated Development of Strain: The Wenchuan Earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China[J]. Annu Rev Earth Planet, 38(1):353 – 382.

## A Study on the Interpretation Ability of Near – field Strong Motion Records to the Rupture Process of the Wenchuan Earthquake

YIN Deyu<sup>1</sup>, LIU Qifang<sup>2</sup>, DONG Yun<sup>1</sup>, SHE Yuexin<sup>1</sup>, WU Jingke<sup>1</sup>,  
CHEN Yongzhen<sup>1</sup>, ZHANG Jihua<sup>1</sup>, CHEN Jiarui<sup>1</sup>

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223001, Jiangsu, China)

(2. School of Civil Engineering of Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

### Abstract

In this paper, 43 near – field acceleration records with uniform azimuth coverage are selected. Then velocity records are obtained by baseline correction, record integral and record filtering. Non – negative least squares method and multi – time window technique are used to invert the rupture process of the 2008 Wenchuan earthquake. The following conclusions are obtained: (1) Forward testing shows that the slip resolution of the 43 near – field stations is different between the south section of the Beichuan fault and the Pengguan fault, which are nearly parallel. The selected records can distinguish the slip of the south section of the Beichuan fault, but the slip resolution of the Pengguan fault is worse. (2) In order to satisfy the second wave packet of stations in the area behind the rupture direction, the southern section of the Beichuan fault or the Pengguan fault needs to produce a rupture to the southwest direction. Considering the fitting residual of waveform and the coincidence of inversion results with surface rupture data, the possible rupture mode is as follows: the rupture started at the low dip angle in the south part of the Beichuan fault, which causes the rupture of the Pengguan fault, and then causes the rupture of the Xiaoyudong fault, which triggers the bilateral rupture of the high dip angle in the south part of the Beichuan fault.

**Keywords:** Wenchuan earthquake; near – field strong motion records; inversion of rupture process; rupture sequence; Xiaoyudong fault