

初步研究及考察成果（一）

2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告

陈运泰 许力生 张勇 杜海林 冯万鹏 刘超 李春来
中国地震局地球物理所，北京 100081

2008年5月12日下午2点28分（北京时间），在四川省的汶川县发生特大地震，陈运泰院士的研究组迅速开展地震资料的分析工作，通过多种分析手段获得了这次地震及两个强余震的震源参数。现将结果报告如下。

注：时间仓促，行文粗糙，纰漏难免，敬请谅解。

一、震源机制

1、2008年5月12日14点28分主震震源机制

从全球长周期台站挑选了如图1左图所示的18个台站的垂直向波形资料通过矩张量反演得到的这次主震震的矩张量解及其最佳双力偶解如图1右图所示。使用的资料采样率为1sps，资料的频率范围为0.005~0.02Hz。结果表明，这次地震是一次以拟冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震。断层向西北方向倾斜，走向为 229° 。这次地震释放的标量地震矩为 4.4×10^{21} Nm，震级为Mw8.3。其它参数见表1、2和3。观测地震图和合成地震图的比较如图2所示。

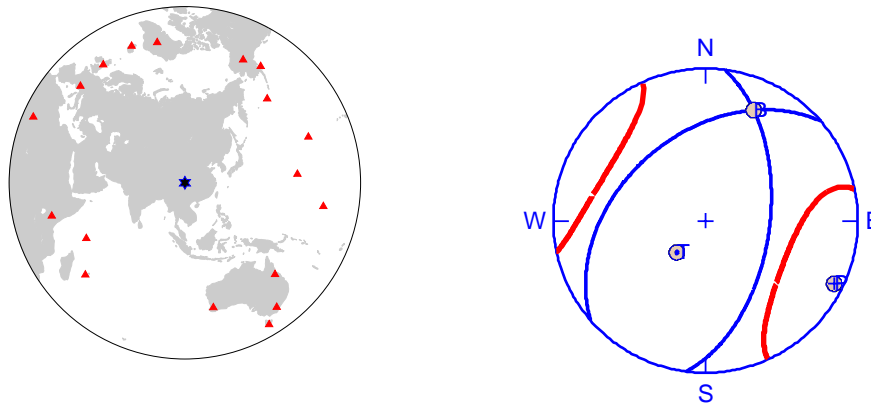


图 1 长周期台站分布 (左); 矩张量解及其震源机制解 (右)

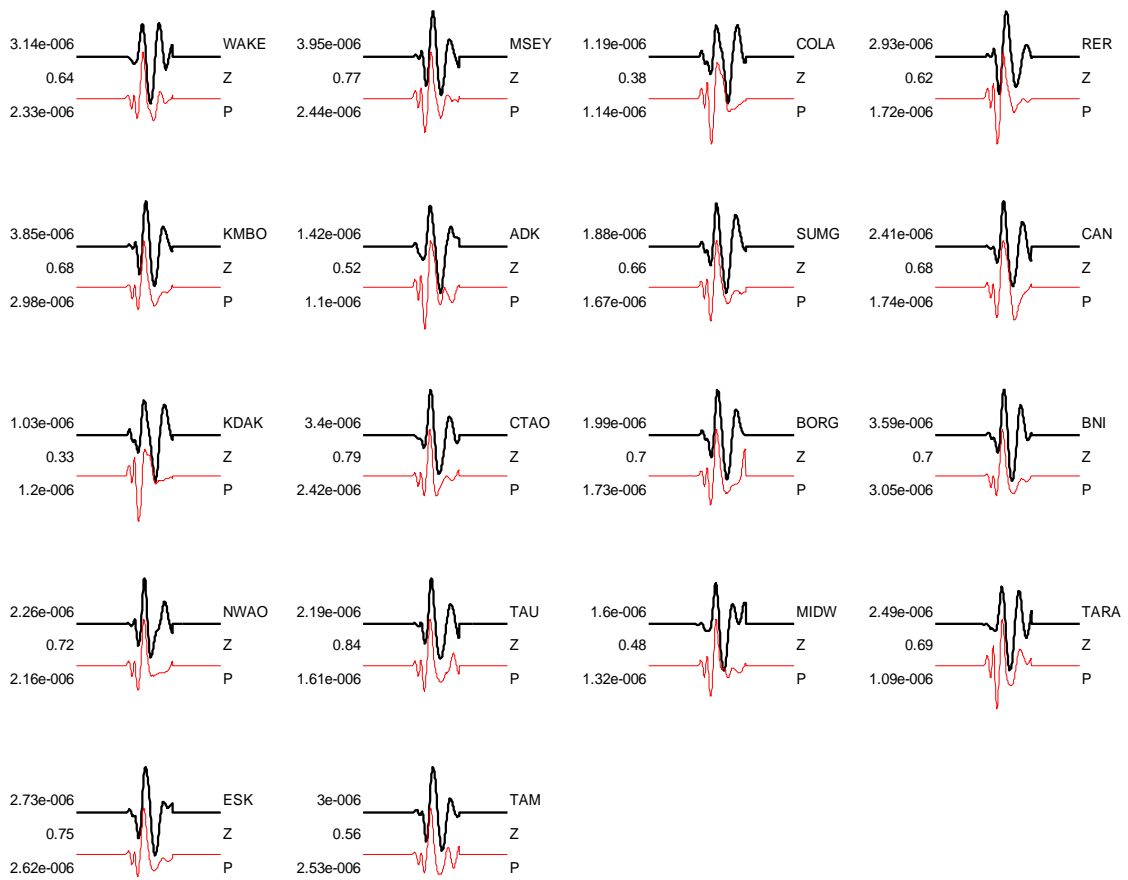


图 2 观测地震图与合成地震图的比较。上面的波形为观测地震图，下面的波形为合成地震图。

表 1 2008 年 5 月 12 日汶川主震震源参数

Date	Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude	Sources
yyyy-mm-dd	hh:mm:ss	/° N	/° E	/km		

2008-5-12	06:28:00.00	31.021	103.367	10	Mw:8.3	IGP-CEA
-----------	-------------	--------	---------	----	--------	---------

表 2 2008 年 5 月 12 日汶川主震矩张量解 (10e21 Nm)

No	M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₂₂	M ₂₃	M ₃₃	M _{DC}	M _{exp}	M _{CLVD}	Source
1	2.53	2.53	-0.22	-1.18	-1.10	5.13	4.04	2.15	0.70	IGP-CEA

表 3 2008 年 5 月 12 日汶川主震最佳双力偶解

Plane I			Plane II			T-axis		B-axis		P-axis		Source
Stri	Di	Rak	Strik	Di	Rak	Az	Pl	Az	Pl	Az	Pl	
ke/°	p/°	e/°	e/°	p/°	e/°	m/°	g/°	m/°	g/°	m/°	g/°	
229	43	123	7	55	63	222	67	23	22	116	7	IGP-CEA

2、2008 年 5 月 12 日 20 点强余震震源机制

从全球宽频带台站挑选了如图 3 左图所示的 12 个台站的垂直向波形资料、通过矩张量反演得到的这次强余震的矩张量解及其最佳双力偶解如图 3 右图所示。使用的资料采样率为 5sps，资料的频率范围为 0.005~0.05Hz。结果表明，这次地震是一次以拟冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震。断层向西北方向倾斜，走向为 226°。这次地震释放的标量地震矩为 4.9×10^{17} Nm，震级为 Mw5.7。其它参数见表 4、5 和 6。观测地震图和合成地震图的比较如图 4 所示。

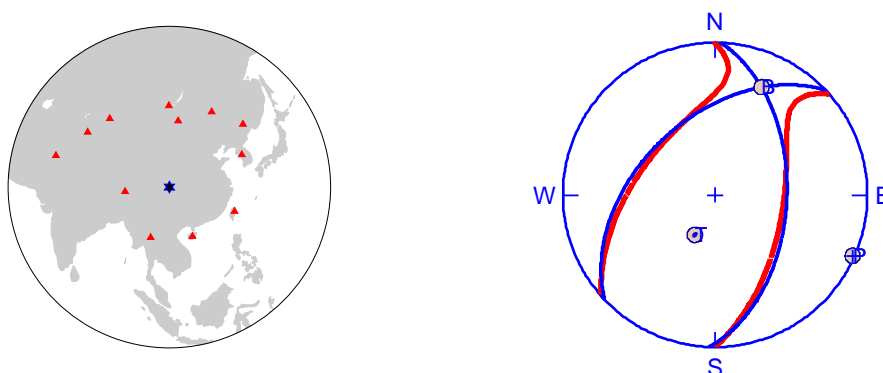


图 3 宽频带台站分布 (左); 矩张量解及其震源机制解 (右)

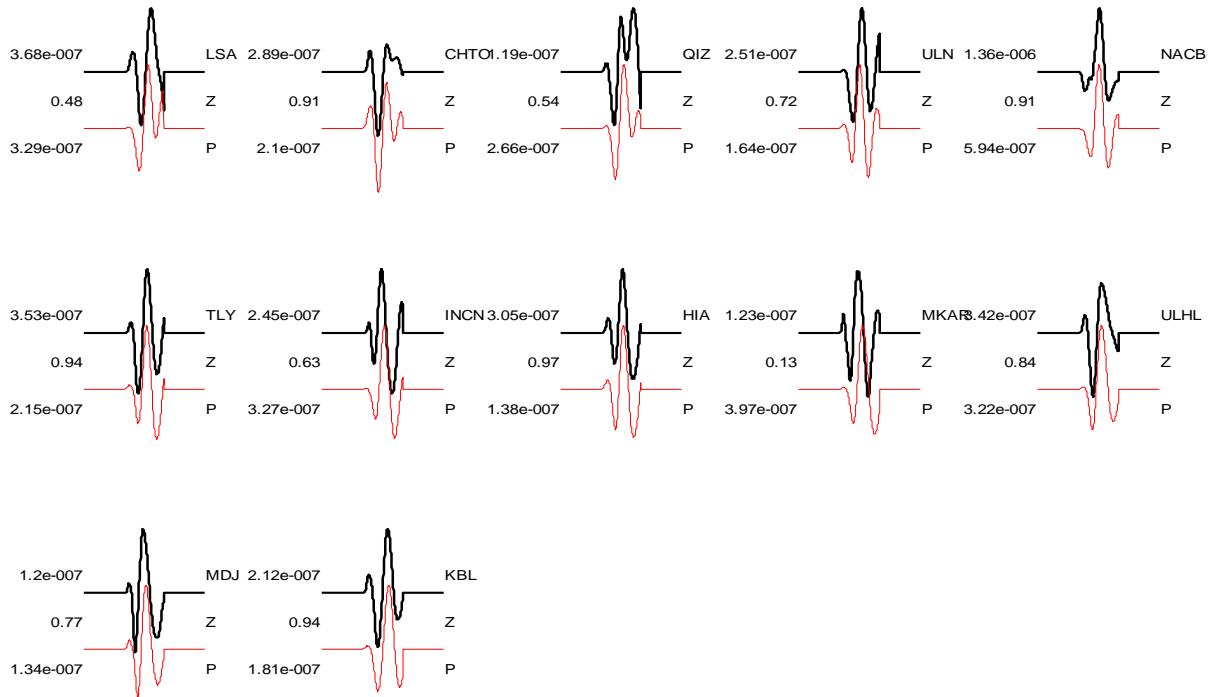


图 4 观测地震图与合成地震图的比较。上面的波形为观测地震图，下面的波形为合成地震图。

表 4 Mw5.7 余震震源参数

No	Date yyyy-mm-dd	Time hh:mm:ss	Latitude /° N	Longitude /° E	Depth /km	Magnitude	Sources
1	2008-5-12	20:08:48.73	31.428	103.834	10	Mw:5.7	IGP-CEA

表 5 Mw5.7 余震矩张量解 (10e17 Nm)

No	M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₂₂	M ₂₃	M ₃₃	M _{DC}	M _{exp}	M _{CLVD}	Source
1	0.01	2.46	-1.27	-4.36	-0.80	3.80	4.97	-0.18	-0.32	IGP-CEA

表 6 Mw5.7 余震最佳双力偶解

Plane I			Plane II			T-axis		B-axis		P-axis		Source
Strike/°	Dip/°	Rake/°	Strike/°	Dip/°	Rake/°	Azm/°	Plg/°	Azm/°	Plg/°	Azm/°	Plg/°	
226	49	123	2	51	58	207	66	23	24	114	1	IGP-CEA

3、2008 年 5 月 13 日 7 点强余震震源机制

从全球宽频带台站挑选了如图 5 左图所示的 12 个台站的垂直向波形资料，

通过矩张量反演得到的这次强余震的矩张量解及其最佳双力偶解如图 5 右图所示。使用的资料采样率为 5sps，资料的频率范围为 0.005~0.05Hz。结果表明，这次地震是一次以拟冲为主、兼少量右旋走滑分量的地震。断层向西北方向倾斜，走向为 204° 。这次地震释放的标量地震矩为 1.9×10^{18} Nm，震级为 Mw6.1。其它参数见表 7、8 和 9。观测地震图和合成地震图的比较如图 6 所示。

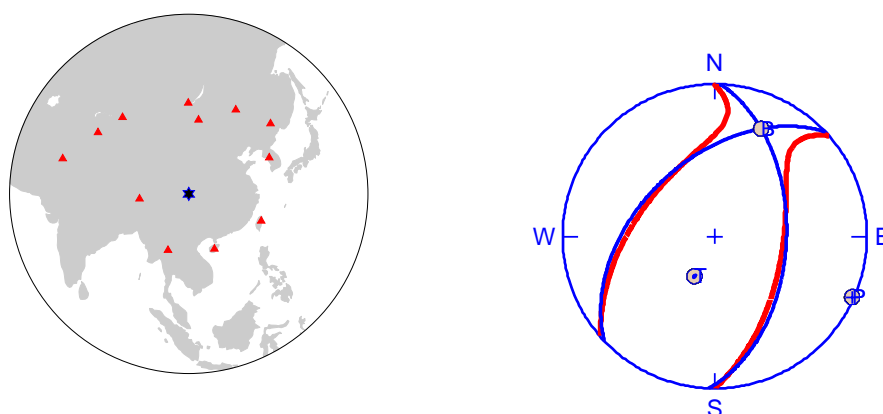


图 5 宽频带台站分布（左）；矩张量解及其震源机制解（右）

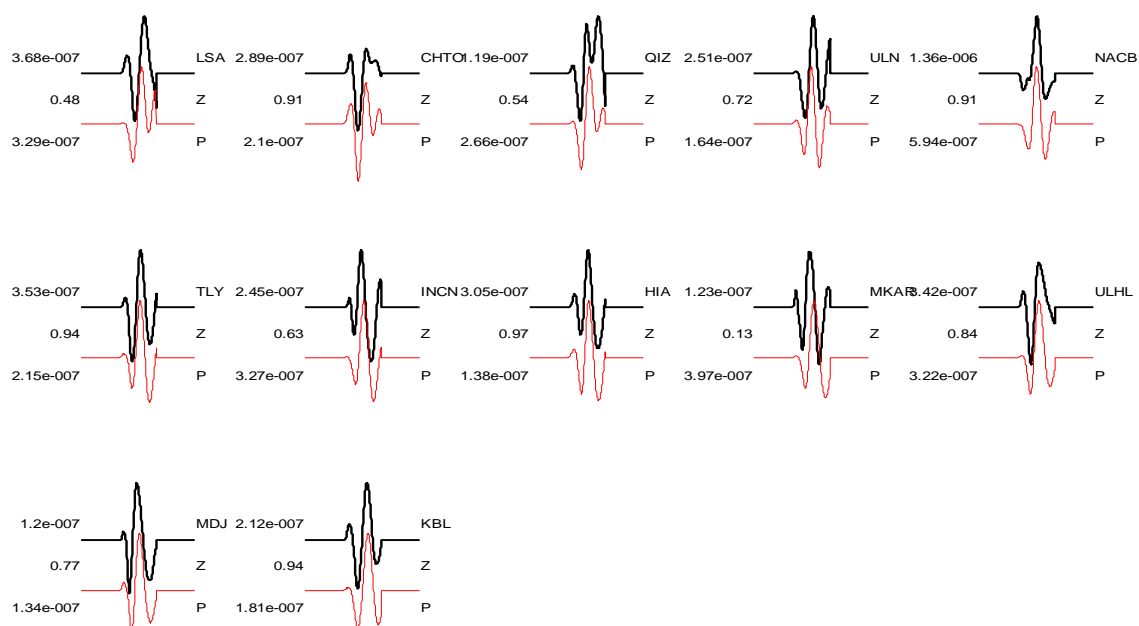


图 6 观测地震图与合成地震图的比较。上面的波形为观测地震图，下面的波形为合成地震图。

表 7 Mw6.1 余震震源参数

No	Date yyyy-mm-dd	Time hh:mm:ss	Latitude /° N	Longitude /° E	Depth /km	Magnitude	Sources
1	2008-5-13	07:07:09:8.26	30.734	103.113	10	Mw:6.1	IGP-CEA

表 8 Mw6.1 余震矩张量解 (10e18Nm)

No	M ₁₁	M ₁₂	M ₁₃	M ₂₂	M ₂₃	M ₃₃	M _{DC}	M _{exp}	M _{CLVD}	Source
1	0.04	0.48	-0.43	-1.39	0.55	1.97	1.88	0.20	-0.03	IGP-CEA

表 9 Mw6.1 余震震源参数最佳双力偶解

Plane I			Plane II			T-axis		B-axis		P-axis		Source
Strike/°	Dip/°	Rake/°	Strike/°	Dip/°	Rake/°	Azm/°	Plg/°	Azm/°	Plg/°	Azm/°	Plg/°	
204	56	98	10	35	78	143	78	20	7	288	10	IGP-CEA

二、远场台阵数据分析

美国阿拉斯加区域台网 (Alaska Regional Network, 简称 AK), 由 25 个宽频带台站构成, 其中有 24 个台站成功地记录到我国四川省汶川县特大地震。我们挑选其中 17 个台站构成台阵, 这个台阵距离震中约 7000km (图 7)。仅利用垂直向波形记录, 借助于非平面波台阵技术, 追踪了这次地震的能量辐射源随时间和空间的变化过程。我们所使用的资料为 P 波初动后 120 秒的直达波。在数据分析之前, 采用 0.2~10Hz 的 4 阶巴特沃斯零相移带通滤波器对原始记录进行了滤波。分析所采用的滑动窗长为 20 秒, 移动步长为 1 秒, 空间搜索精度为 0.01°。由此得到的能量辐射源的位置如图 8 所示。分析表明, 这次地震能量辐射源跨度达 600km, 但主要能量释放发生在前 80 秒, 在这段时间内的破裂长度约 300km, 位于震中东北方向, 由此推断的平均破裂速度约 3.1km/s。换句话说, 这次地震开始于汶川县震中位置, 然后以 3.1km/s 速度向东北方向传播 300km, 最后, 破裂反向传播, 在震中西南也有微弱的能量辐射。

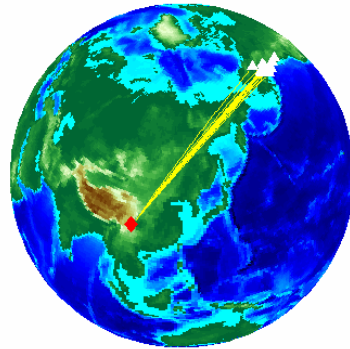


图 7 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县特大地震震中位置与使用台阵的相对位置。红色菱形表示震中位置，白色三角形表示 AK 台阵

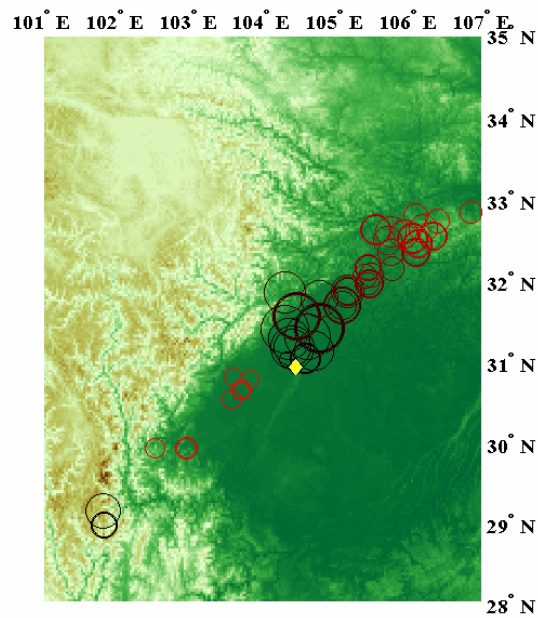


图 8 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县特大地震的破裂传播图像。图中的黄色菱形为地震震中或地震断层的初始破裂点，圆圈用来描述地震断层的破裂传播过程，圈的大小表示地震能量的相对大小，圈的颜色由深到浅表示传播的先后顺序。

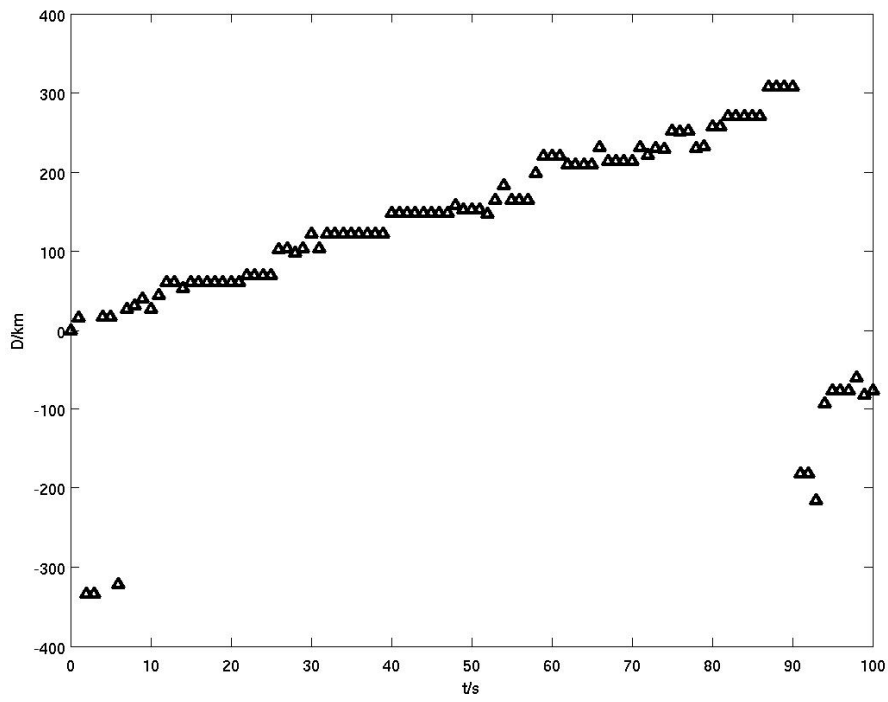


图 9 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县特大地震能量辐射源相对于震中的距离随时间的变化。

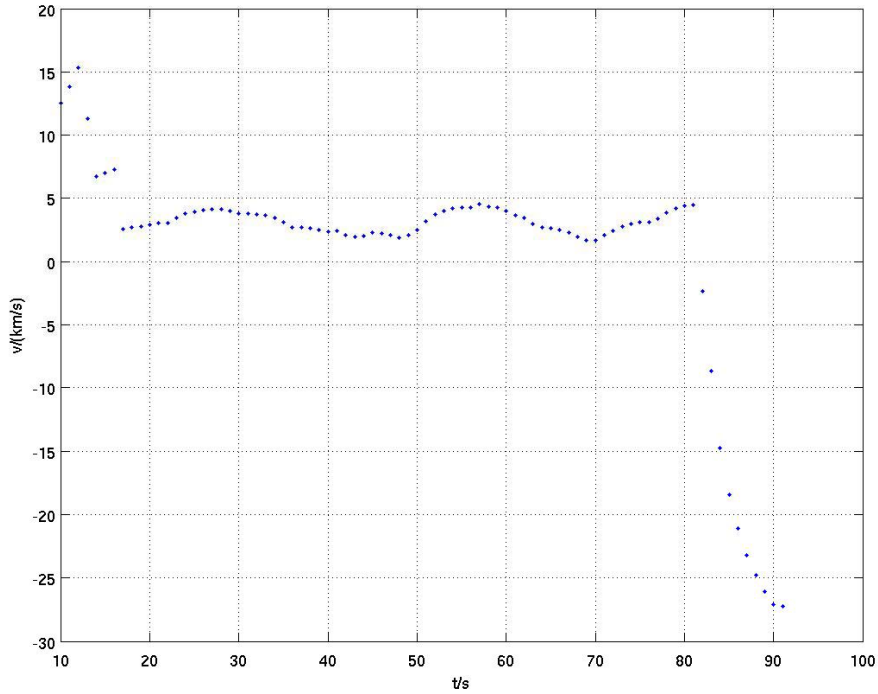


图 10 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县特大地震过程中破裂速度随时间的变化。

三、基于全球台网的宽频带波形资料的震源过程分析

为保证足够长的直达 P 波波形和理想的台站分布，我们选用全球范围内最小方位角间隔为 5° 的 21 个震中距超过 7000km 的长周期远震台站的资料（图 11）。综合多种地震矩张量的反演结果，经过多次试解之后，我们选取的发震断层参数为：走向 230° /倾角 39° /滑动角 120° 。反演分析中所使用的格林函数是基于 IASPEI91 全球速度模型计算的。对观测资料和格林函数都使用了 0.002—0.2Hz 的滤波器。

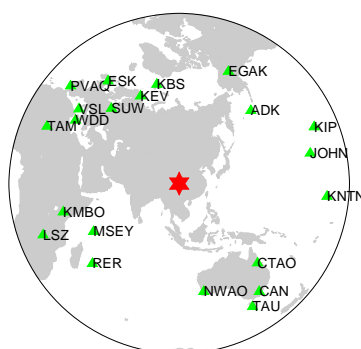


图 11 震中和所使用的台站位置分布。

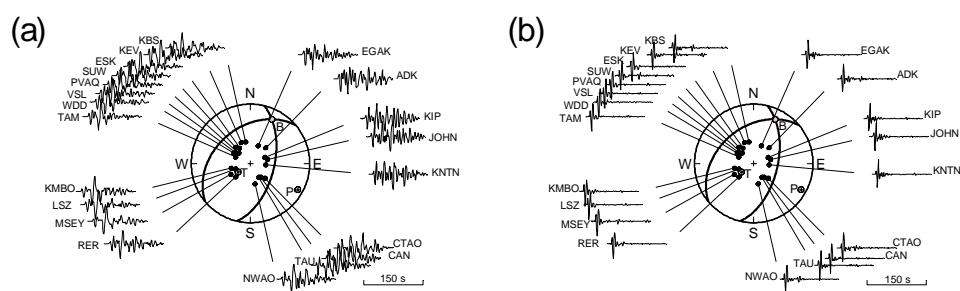


图 2 (a) 观测波形；(b) 格林函数波形。图中的波形包括了 P 波初动之前的 10s

首先给定一个走向 230° /倾角 39° /滑动角 120° 的断层平面（图 12），此断层面的尺度为：走向方向 620km，倾向方向 50km。将此断层分别在走向方向和倾向方向均匀地分成 31×5 块子断层，因此每个子断层的尺度为 $20\text{km} \times 10\text{km}$ 。设定震源（初始破裂点）位于走向方向第 21 个，倾向方向第 2 个子断层。

反演得到的断层面的静态位移分布如图 13 所示，最大静态位错约为 6.7m，平均滑动量 1.5m，最大滑动速率为 1.2m/s，平均滑动速率为 0.3m/s。整个破裂以单侧破裂为主，主要的破裂向北东方向传播了约 200km，但在北东方向 300km 处也存在着较小的滑动位移量 (<1m)；在震中西南方向，滑动位移和破裂延伸范围总体上都比较小。从最大滑动位移的分布位置来看，最大静态滑动位移主要位于震中和震中北东方向 100km 以内；另外在震中北东方向 150km 左右，也存在着最高达 4.4m 的静态滑动位移。整个断面上的滑动位移分布比较零散，说明破裂在传播过程中遭遇了多个障碍体的阻挡，因此在受阻挡区域出现破裂空区。

图 14 所示的震源时间函数结果反映了此次地震破裂的时间过程。破裂大致由 3 个主要的子事件组成。第一个子事件为位于 0—15s，这个时间内释放了整个过程的 16% 的地震矩；第二个子事件开始于第 17s，结束于第 46s，为本次地震过程中最大也是最主要的一次事件，释放了 63% 的地震矩；最后一次事件在第 48s 和第 60s 之间，同样释放了 16% 的地震矩。第 60s 以后，总体上整个破裂已经基本完成，破裂进入愈合阶段，仍有一些地方在继续发生断断续续的破裂，这些破裂只占有所有地震矩的 5%。因此，此次地震的主要能量释放时间大约为 60s，比根据台阵资料分析的结果短 20s。图 15 展示了破裂沿走向方向的延伸情况，可以看出，整个地震过程中，破裂主要向北东方向延伸，经过估算，得到此次的平均破裂速度约为 2.8km/s。图 16 给出了此次反演得到的 21 个台站处观测波形与合成波形的比较。大多数台站的相关系数都非常高，意味着反演结果对资料的解释程度较好。这从一个方面验证了此次反演结果的可信性。

另外，需要指出的是，从滑动量的静态位移分布看，滑动区域之间存在空区，已经发生的余震也没有完全填充这些空区。这些空区很可能是未来发生强余震的地方。

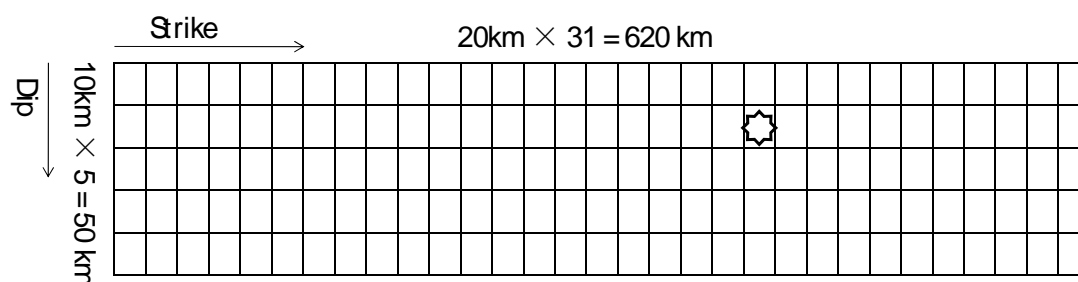


图 12 断层面划分的子断层示意图。白色八角星表示震中

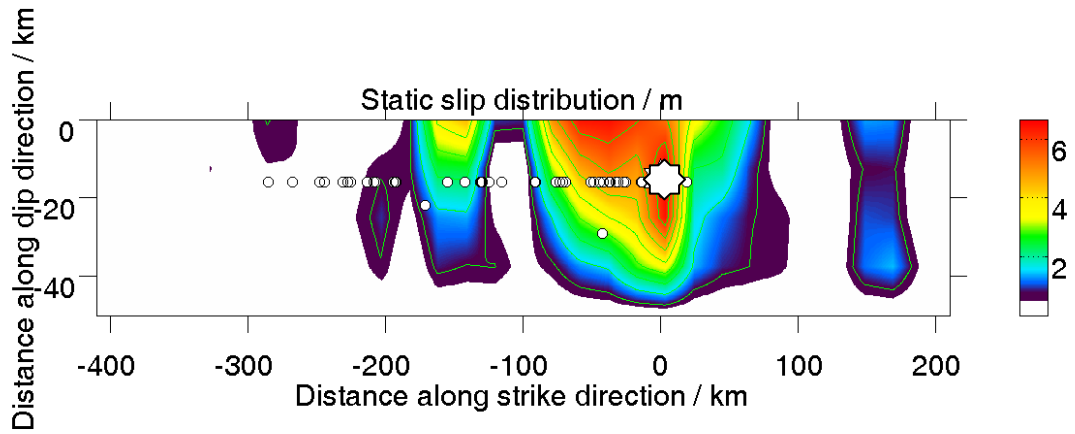


图 13 断面上的静态位错分布。白色八角星表示震中，小圆点为余震在断面上的投影

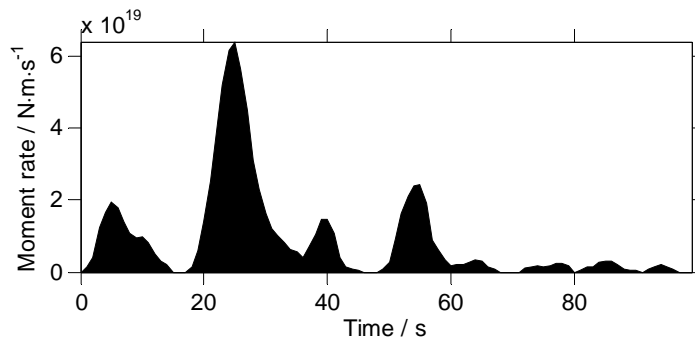


图 14 地震震源时间函数

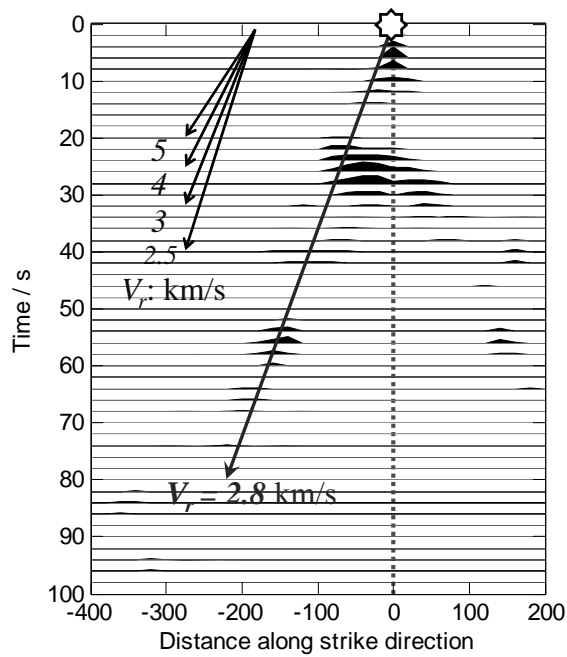


图 15 破裂沿走向方向的延伸情况

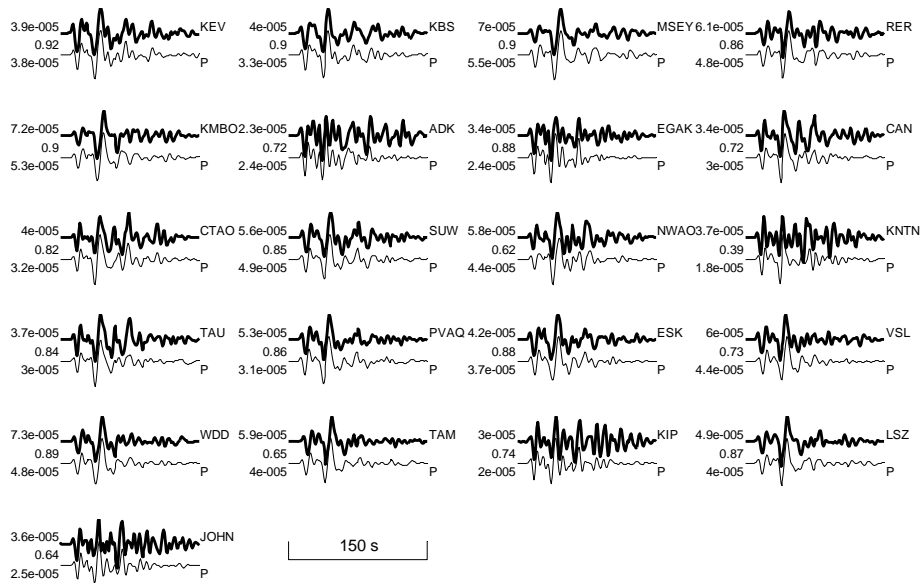


图 16 观测波形和合成波形的比较。粗线表示观测波形，西线表示合成波形。每个子图中，左边从上到下依次为：观测波形最大幅度，相关系数，合成波形最大幅度；右边由上到下依次为台站名，震相名

四、汶川地震同震位移场计算

基于弹性半空间位错理论，利用从地震波形资料反演得到的发震断层静态滑动量分布(图 17)，计算了 2008 年 05 月 12 日四川汶川主震造成的近断层地表位移分布，包括南北、东西和垂直 3 分量。

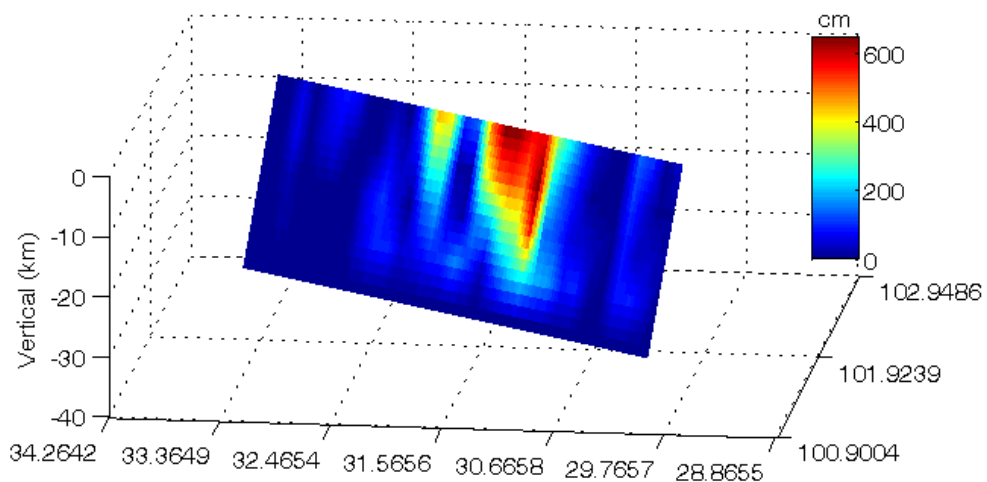


图 17 发震断层静态位移分布

计算表明，地表最大标量位移 $> 4\text{m}$ ，位于成都西北（ 103.9°E ， 31.73° ）附近，距离都江堰市仅 30 余公里。形变较大的区域覆盖了汶川、茂县、理县和北川等四县。

在垂直断层走向方向以 120km 间距提取 5 条剖面，每条剖面采点 5000 个，分别标记为 prof_0，prof_1，...，prof_4，如图 21 所示。这 5 条剖面清楚地表明沿断层不同点的位错大小，如图 22-A、B、C 和 D。

表 1 位移量统计表

分量	范围	最大位置	单位
垂直 V	-70~300	汶川、北川等	cm
南北 SN	-70~120	汶川、北川等	cm
东西 EW	-200~300	汶川、北川等	cm
标量合成	0~440	汶川、北川等	cm

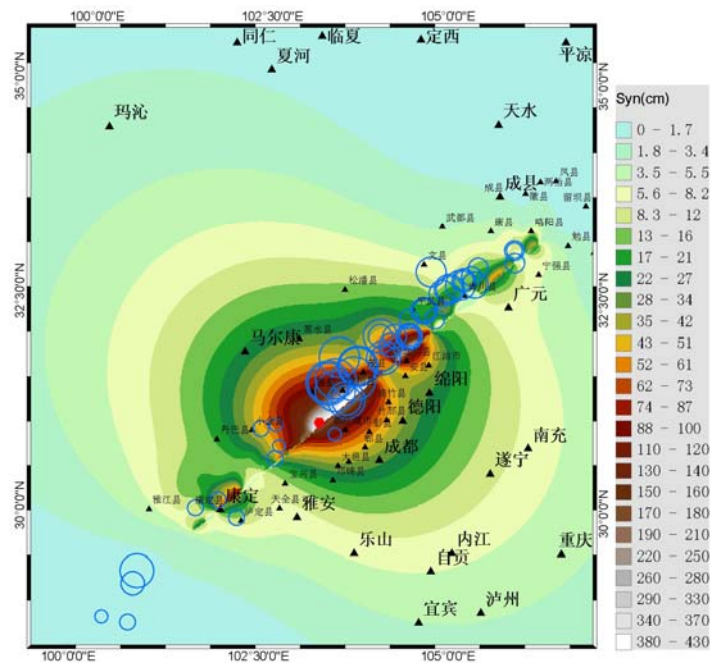


图 18 利用图 17 所示的断层模型计算的地表位移场（标量）。图中的蓝色圈和图 8 中的相同。

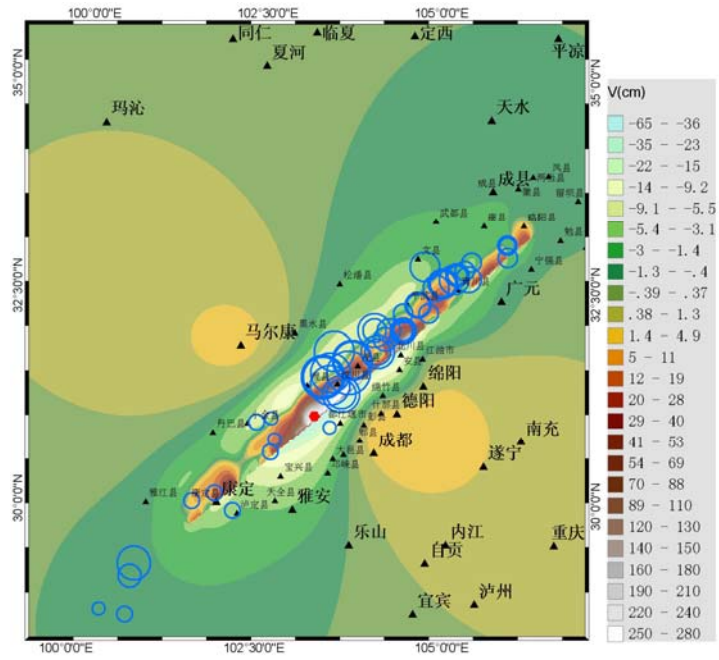


图 19 利用图 17 所示的断层模型计算的地表位移场（垂直分量）。图中的蓝色圈和图 8 中的相同。

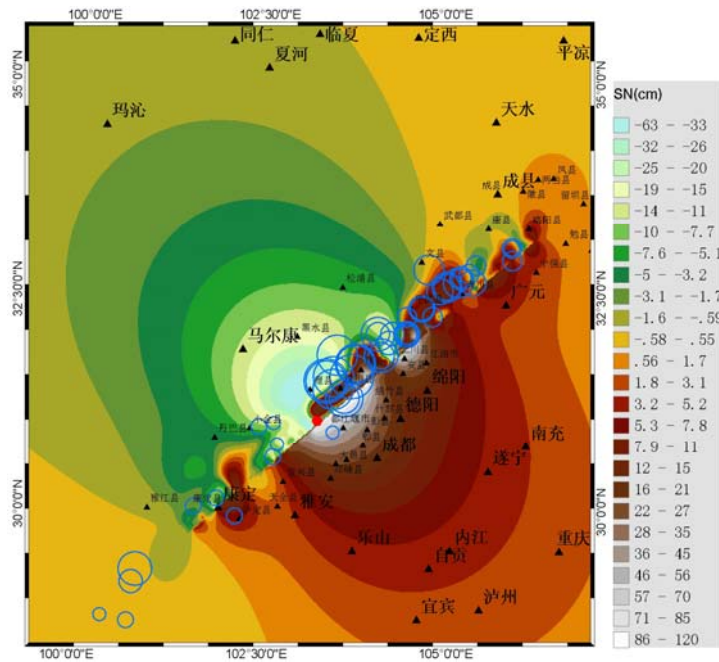


图 20 利用图 17 所示的断层模型计算的地表位移场（南北分量）。图中的蓝色圈和图 8 中的相同。

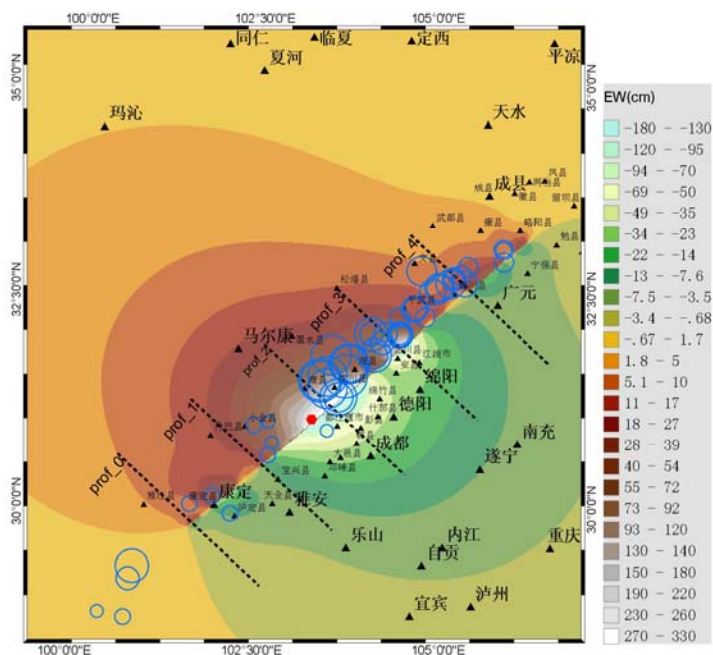


图 21 利用图 17 所示的断层模型计算的地表位移场（东西分量）。图中的蓝色圈和图 8 中的相同。

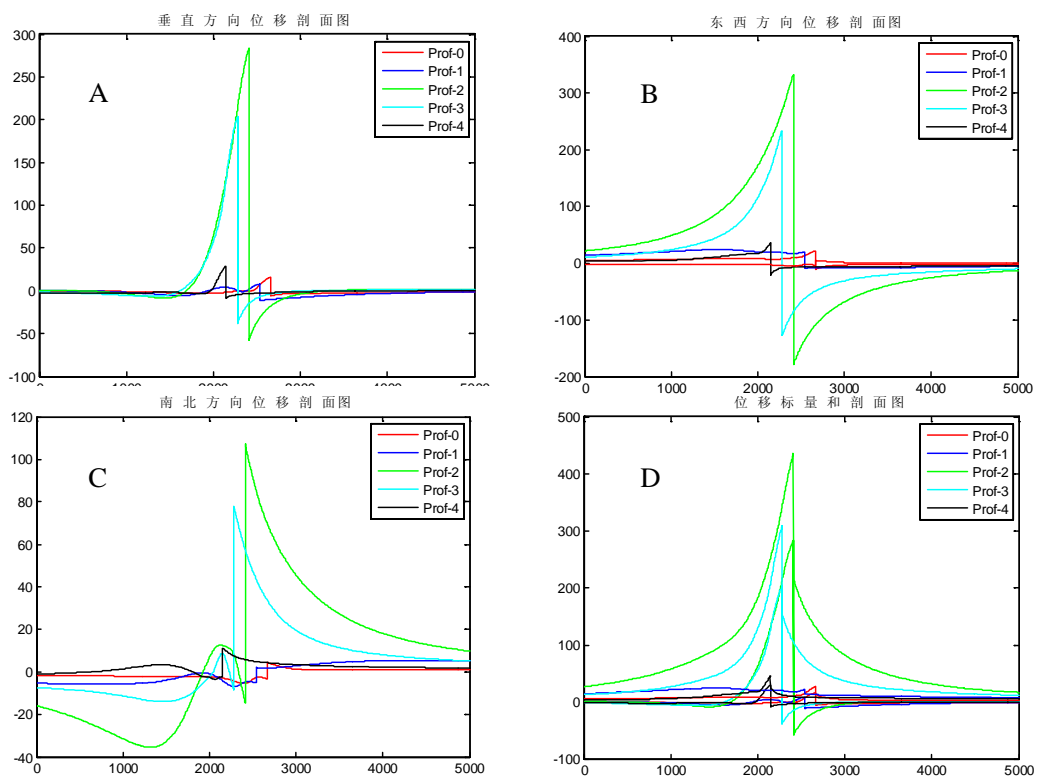


图 22 位移剖面示意图

五、震源机制随时间和空间的变化

总体上讲，这次地震是一次以逆冲为主兼一定走滑分量的地震，矩震级为 Mw8.3。但这次地震的震源机制比较复杂，在震源过程中震源机制随着时间和空

间在发生变化。如果将整个地震过程分成 7 个阶段，那么，在地震的开始阶段表现为逆冲为主，但后来逐渐转变为以走滑为主。7 个阶段对应的地震震级分别为 Mw7.1、Mw7.1、Mw7.6、Mw7.4、Mw7.4、Mw7.4 和 Mw7.2（图 23）。图 24 比较了观测地震图和合成地震图，可以看出，用变机制的断层模型可以更好的解释观测地震图。

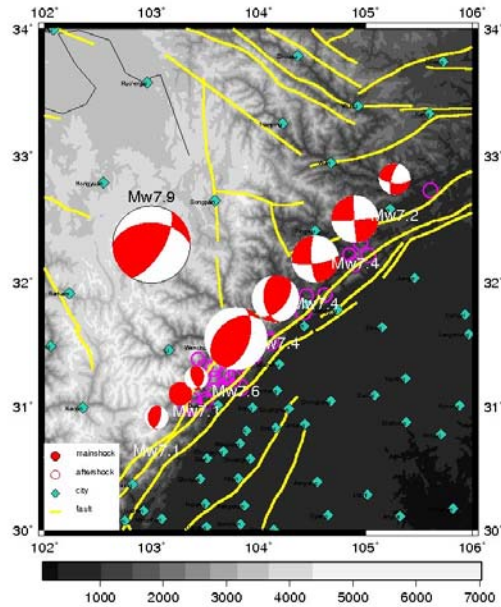


图 23 2008 年 5 月 12 日四川省汶川县特大地震的震源机制随时间和空间的变化。

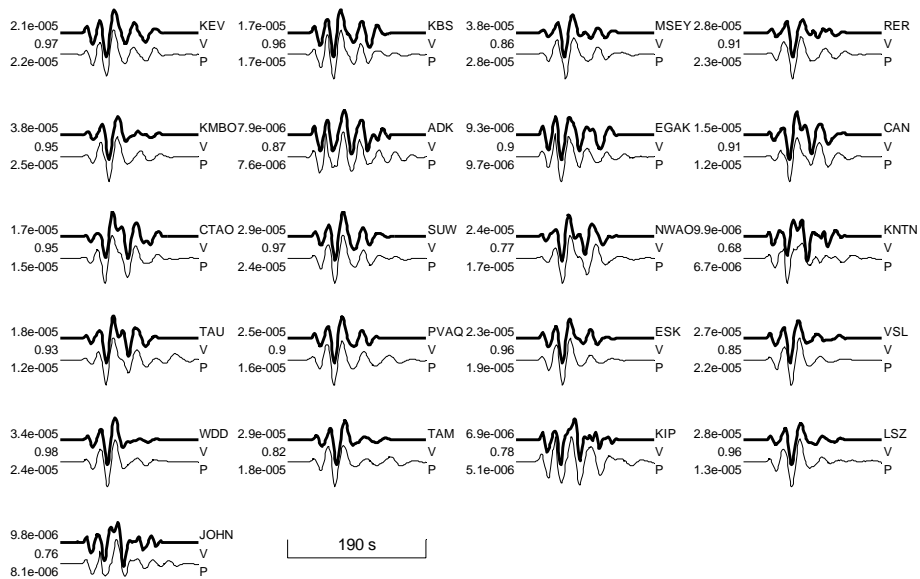


图 24 观测—合成波形比较，粗线表示观测波形，西线表示合成波形。每个子图中，左边从

上到下依次为：观测波形最大幅度，相关系数，合成波形最大幅度；右边由上到下依次为台站名，震相名