

# 2004 年首都圈地区中小地震 的矩张量反演<sup>\*</sup>

许力生<sup>\*</sup> 蒋长胜 陈运泰 李春来 张天中

(中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所)

**摘要** 通过首都圈地区宽频带数字地震波形反演, 获得了 2004 年发生在该地区的 51 次中小地震的矩张量解, 由此确定了这些地震的标量地震矩、矩震级、双力偶分量和补偿线性矢量偶极分量的大小以及断层面参数和应力轴参数, 并通过数值试验对反演结果进行了评价.

**关键词** 首都圈地区 中小地震 矩张量反演

**中图分类号**: P315.3 **文献标识码**: A

## 引言

地震的震源机制解在地球科学的发展中一直在发挥重要作用, 而且必将发挥更大的作用. 早在 20 世纪 60 年代, 地震的断层面解就被用来研究应力场方向(McKenzie, 1969). 数十年来, 有大量的研究都与地震的震源机制解有关(Tapponnier, Molnar, 1976; Zoback *et al*, 1987; Xu *et al*, 1992; Xu, 2001; Kubo, Fukuyama, 2003). 早期的震源机制大都是由 P 波初动符号确定的, 由于台站的分布所限, 只有少部分地震的震源机制才能得以确定. 1970 年代以来, 波形资料可以用来确定地震的矩张量解及震源机制(Gilbert, Dziewonski, 1975; Patton, Aki, 1979), 而且可用的波形资料(如地球的自由振荡、面波、体波等各种震相)使能够确定震源机制的地震数目大大增加了.

当然, 通过地震矩张量的反演, 除地震的断层面解以外, 还可以得到地震矩张量、标量地震矩、矩震级、各向同性分量和补偿线性矢量偶极成分等其它震源参数, 而这些参数正在被其它研究所用. 例如, 地震矩-频度关系的研究(Frohlich, Davis, 1993; Sornette *et al*, 1996; Kagan, 1997), 非双力偶源的全球分布的研究(Kawakatsu, 1991), 地震分类的研究(Reasenber, 1999), 地壳势能变化的研究(Tanimoto, Okamoto, 2000), 以及震源机制与时间关系的研究(Kagan, 2000)等等.

1995—2000 年, 我国建立了许多区域或地方的数字地震台. 这些台站的建立使我们能够利用它们记录到的波形资料, 通过矩张量反演方法确定中小地震的矩张量解、震源机制和其它震源参数. 本文通过地震矩张量反演方法, 确定了首都圈地区发生于 2004 年的中小地震的矩张量及其相关参数.

<sup>\*</sup> 国际 973 项目(2001CB711005, 2004DFA06000)和中国地震局重点攻关项目(2004BA601B)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 07AC1007.

2006-08-16 收到初稿, 2007-02-06 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者. e-mail: xuls@cea-igp.ac.cn

1 方法

在频率域里,用矩张量描述的位于坐标原点的地震点源在某一观测点  $r$  引起的地震位移可以表示为

$$u_i(r, \omega) = G_{ij, k}(r, \omega) \cdot M_{jk}(\omega) \tag{1}$$

式中,  $\omega$  为角频率,  $u_i(r, \omega)$  为地震的观测位移谱,  $M_{jk}(\omega)$  为地震矩张量谱,  $G_{ij, k}(r, \omega)$  为格林函数谱. 即,地震位移的谱等于格林函数的谱和矩张量的谱的乘积;反过来,矩张量谱等于地震位移谱和格林函数谱的商.

对于中小地震而言,由于震源持续时间较短,我们总可以找到一个合适的频段,以致在这个频段内实际地震的震源时间函数可以当作一个简单的脉冲,从而可以用狄拉克- $\delta$ 函数来代表震源时间函数. 在这种情况下,式(1)可以写成

$$u_i(r, \omega) = G_{ij, k}(r, \omega) \cdot M_{jk} \tag{2}$$

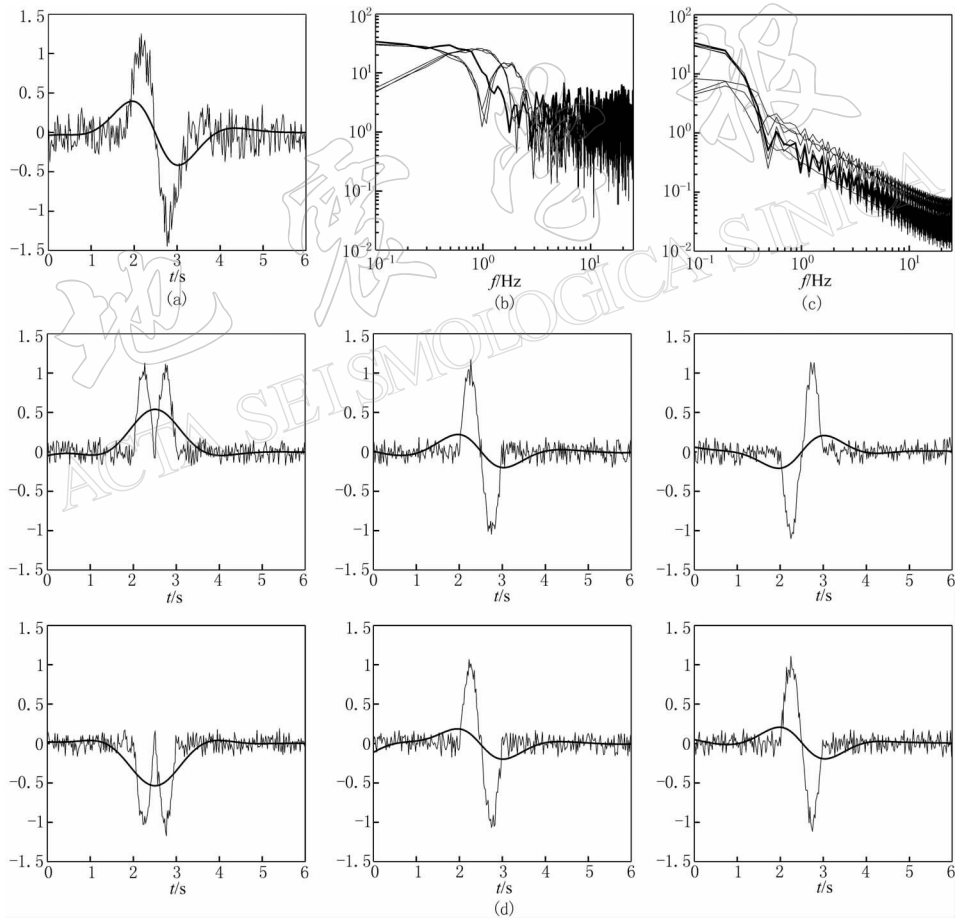


图 1 滤波前后的观测震相与相应的格林函数及其振幅谱

(a) 滤波前(细线)与滤波后(粗线)的观测震相;(b) 滤波前观测震相的振幅谱(粗线)与滤波前格林函数的 6 个分量的振幅谱(细线);(c) 滤波后观测震相的振幅谱(粗线)与滤波后格林函数 6 个分量的 振幅谱(细线);(d) 滤波前(细线)与滤波后(粗线)的格林函数

即描述震源的地震矩张量与时间或频率无关。

在实际工作中,我们可以选择适当的带通滤波器,使观测资料和格林函数位于相同的频段,并满足地震的震源时间函数为狄拉克- $\delta$ 函数的条件。如图 1 所示,在滤波之前,观测波形与格林函数的谱呈现出不同的形状,观测波形的谱的拐角频率不同于格林函数的谱的拐角频率(图 1b)。然而,在滤波之后,观测波形的谱与格林函数的谱的形状非常相似,它们的拐角频率也基本一致(图 1c)。在这种情况下,实际地震的震源时间函数即可近似为狄拉克- $\delta$ 函数。与此同时,我们注意到,滤波后的观测波形(图 1a)和格林函数的各分量(图 1d)仍然保留着它们的基本特征,没有丢失用以确定矩张量解的长周期信息。

## 2 观测资料与格林函数

1995—2000 年,中国地震局在北京、河北和天津地区建立了 107 个数字地震台。其中 48 个台架设了宽频带数字地震仪,59 个台站架设了短周期数字地震仪。在这项工作中,我们处理了 2004 年度首都圈地区( $113^{\circ}\text{E}\sim 121^{\circ}\text{E}$ ,  $37^{\circ}\text{N}\sim 41.5^{\circ}\text{N}$ )48 个宽频带地震仪记录到的地震资料,挑选了 51 个地震事件,其中震级最小的地震为  $M_L 2.0$ ,它们满足初至的直达波同时被 3 个或 3 个以上台站记录清楚的条件。这些宽频带地震仪的频率范围为  $0.05\sim 20$  Hz,但是,我们对观测资料使用了  $0.2\sim 5$  Hz 的带通滤波器,以剔除较低频和较高频噪声而不破坏用于矩张量反演的信息。

格林函数是利用平面分层介质的反射、折射率方法计算的(Kennett, 1983)。当地的地壳模型是在中国地区平均地壳速度模型的基础上(中国地震局震害防御司, 1992),通过观测地震图和合成地震图到时的比较建立的。为了得到一个平均的分层地壳模型,我们选择了不同震中距的实际记录,然后计算相应震中距的合成地震图,并与观测地震图进行比较。如此反复,我们可以得到一个模型,使基于它的合成地震图的 P 波到时和 S 波到时与观测地震图的基本一致。经过调试,我们最终采用了 3 层地壳模型:第一层为 200 m 的覆盖层, P 波速度为  $2.40\text{ km/s}$ , S 波速度为  $1.0\text{ km/s}$ , 密度为  $1.81\text{ g/cm}^3$ ,  $Q_P=0.03$ ,  $Q_S=0.06$ ;第二层的厚度为 15 km, P 波速度为  $5.71\text{ km/s}$ , S 波速度为  $3.20\text{ km/s}$ , 密度为  $2.7\text{ g/cm}^3$ ,  $Q_P=0.001$ ,  $Q_S=0.002$ ;第三层的厚度为 25 km, P 波速度为  $6.83\text{ km/s}$ , S 波速度为  $3.70\text{ km/s}$ , 密度为  $3.0\text{ g/cm}^3$ ,  $Q_P=0.001$ ,  $Q_S=0.002$ 。由于实际的地壳分层界面未必是水平的,所以,不可能得到一个唯一的水平分层速度模型可以在所有的震中距上达到观测走时与合成走时的一致。由于水平分层模型只是对实际复杂模型的简化,所以,不可能考虑次生震相的到时,而只能考虑直达 P 波与 S 波的到时。由于在计算合成地震图时,我们不考虑震源机制对波形的影响,所以我们对观测地震图和合成地震图做了如下处理,以同时突出 P 波和 S 波:以观测地震图或合成地震图的垂直分量为实部、切向分量为虚部建立复时间序列,并计算此复时间序列的模(模时间序列),然后进行比较。图 2a 是陡河台(DOH)记录到的震中距为 21 km 的一次地震的模时间序列与响应的合成图的模时间序列,图 2b 是兴隆台(XIL)记录到的震中距为 90 km 的一次地震的观测图模时间序列与响应的合成图的模时间序列。从图中可以看出,观测到时与合成到时可以得到相当好地吻合。不过,也可以看到次生震相的到时很难得到吻合,而且震中距越大,次生震相越复杂,其到时也越难以吻合。

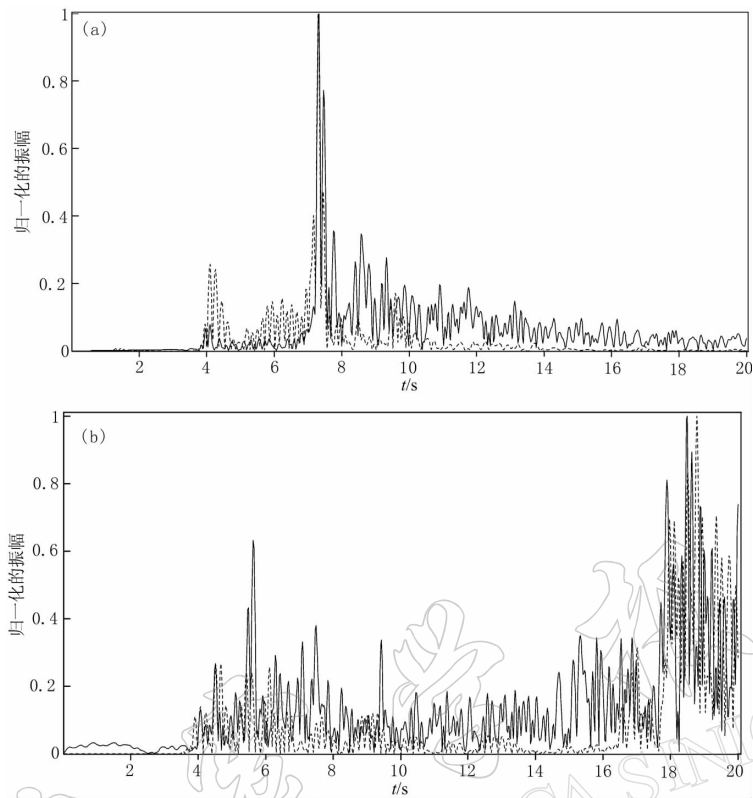


图 2 观测地震图与合成地震图到时的比较

(a) 震中距为 21 km 的观测地震图(实线)与合成地震图(虚线)的模时间序列;  
(b) 震中距为 90 km 的观测地震图(实线)与合成地震图(虚线)的模时间序列

3 地震矩张量反演

地震矩张量的反演是通过软件 QUICKMT(许力生, 陈运泰, 2004)来实现的. 该软件适合于全波的反演, 也适合于某一震相的反演. 在本工作中, 我们只使用了直达 P 波. 首先, 根据地震的大小和仪器的频率特性给定一个频率范围. 当程序开始运行时, 带通滤波器的频率上限会由大到小逐渐变化, 生成不同频段的带通滤波器. 这样, 地震矩张量反演的过程在不同的频段进行, 分别得到不同的结果. 最后, 我们选择波形拟合得最好的频段, 把这个频段的反演结果作为最终的结果. 例如, 北京时间 2004 年 10 月 11 日 22 点 3 分 30 秒发生在  $39.598^{\circ}\text{N}$ 、 $118.180^{\circ}\text{E}$  的一次  $M_L 2.0$  地震的反演输出结果如下:

- 发震时刻: 2004-10-11, 22:03:30;
- 事件纬度  $39.598^{\circ}\text{N}$ 、经度  $118.180^{\circ}\text{E}$ 、深度 9.9 km;
- 台站数目为 6、震相数目为 6、分向为 Z;
- 获得矩张量解的资料的频率上限为 0.9375 Hz;
- 地震矩数量级为  $1.0 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}$ ;
- 标量地震矩为  $10.08 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;
- 矩震级  $M_w 1.9$ ;

矩张量  $m_{11}$ ,  $m_{12}$ ,  $m_{13}$ ,  $m_{22}$ ,  $m_{23}$ ,  $m_{33}$  分别为  $-3.11$ ,  $2.97$ ,  $3.23$ ,  $-2.08$ ,  $-7.88$ ,  $5.19 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;

爆炸成分为  $0$ ;

补偿线性矢量偶极(CLV D)成分为  $-0.25 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;

最佳双力偶(DC)成分为  $10.08 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;

节面 I : 走向、倾角、滑动角分别为  $27^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $77^\circ$ ;

节面 II : 走向、倾角、滑动角分别为  $249^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $130^\circ$ ;

$T$  轴: 本征值、方位角、倾角分别为  $10.33$ ,  $280^\circ$ ,  $58^\circ$ ;

$B$  轴: 本征值、方位角、倾角分别为  $-0.51$ ,  $31^\circ$ ,  $12^\circ$ ;

$P$  轴: 本征值、方位角、倾角分别为:  $-9.83$ ,  $128^\circ$ ,  $29^\circ$ .

台站	纬度	经度	震中距/km	震中距/ $^\circ$	方位角/ $^\circ$
DOH	39.752	118.328	21	0.19	36.55
QIX	40.199	118.311	67	0.61	9.49
CHL	39.758	119.095	80	0.72	76.96
JIX	40.076	117.496	78	0.71	312.41
XLD	40.402	118.102	89	0.81	355.76
TLK	40.146	119.046	95	0.86	50.33

以上的反演输出结果不但包含震源参数信息,如地震矩张量解、标量地震矩、矩震级以及双力偶解等,而且包括反演所用的资料信息,如资料的数量、台站参数以及资料的频率上限等.

图 3 为北京时间 2004 年 10 月 11 日 22 点 3 分 30 秒发生在  $39.598^\circ\text{N}$ 、 $118.180^\circ\text{E}$  的  $M_L2.0$  地震的震源机制解的“海滩球”表示及观测波形与合成波形的比较.可以看出,该震源机制解很好地解释了频率低于  $0.9375 \text{ Hz}$  的直达  $P$  波.

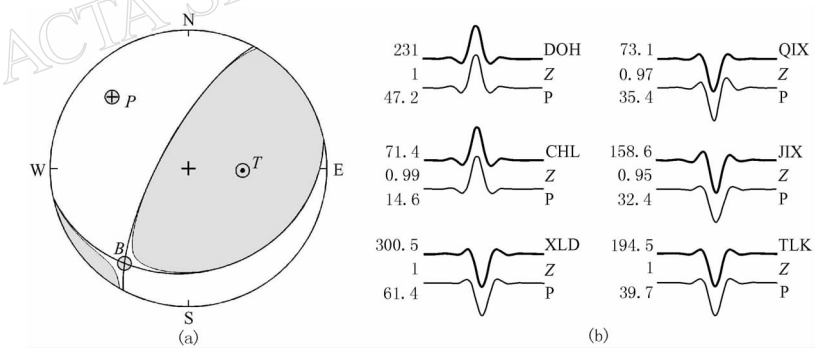


图 3 2004 年 10 月 11 日 22 点 3 分 30 秒  $M_L2.0$  地震的震源机制解的“海滩球”表示(震源球下半球投影)(a)及观测波形与合成地震波形(b)的比较.图(b)中左边的数字分别表示观测波形的最大振幅、相关系数和合成波形的最大振幅,右边分别表示台站名称、分向和震相

2004 年 1 月—2005 年 1 月在首都圈地区发生了 200 多次  $M_L2.0$  以上的地震,但满足初至波为直达  $P$  波、波形清楚且同时被 3 个以上台站记录到的地震事件只有 51 次.我们对这 51 次地震的资料使用了同样的反演方法,得到了它们的地震矩张量和其它相关参数.图 4 给出了这些地震震源机制的“海滩球”表示,在表 1 中列出了这些地震的震源参数.

表 1 首都圈地区中小地震矩心矩张量解列表

编 号	年-月-日	时:分	$\varphi_N/^{\circ}$	$\lambda_E/^{\circ}$	深度 /km	震级 $M_L$	节面 I			节面 II			$M_W$	$M_0$	CLVD	Exp/ N·m	T 轴			P 轴			B 轴			
							$\Phi/^{\circ}$	$\delta/^{\circ}$	$\lambda/^{\circ}$	$\Phi/^{\circ}$	$\delta/^{\circ}$	$\lambda/^{\circ}$					Ei	$Az/^{\circ}$	$Pl/^{\circ}$	Ei	$Az/^{\circ}$	$Pl/^{\circ}$	Ei	$Az/^{\circ}$	$Pl/^{\circ}$	
01	2004-01-02	15:26	39.70	118.85	9.9	2.3	257	33	140	23	69	64	1.5	1.98	0.1	10 <sup>11</sup>	1.87	257	57	0.21	33	24	-2.08	132	20	B
02	2004-01-20	16:34	39.73	118.78	10	4.7	172	20	92	350	70	89	2.8	1.67	0.36	10 <sup>13</sup>	1.31	259	65	0.72	350	1	-2.03	80	25	B
03	2004-01-20	16:50	39.72	118.78	9.8	2.2	24	50	37	268	62	134	1.2	8.29	0.15	10 <sup>10</sup>	8.13	230	51	0.31	65	38	-8.44	329	7	B
04	2004-01-22	03:42	39.72	118.78	10	2.0	265	17	-135	131	78	-78	0.9	2.94	0.60	10 <sup>10</sup>	2.34	211	32	1.20	308	12	-3.54	56	55	B
05	2004-02-02	10:50	40.25	116.09	23.9	2.2	347	77	-117	234	30	-26	1.9	8.24	0.50	10 <sup>11</sup>	7.73	99	27	1.01	354	27	-8.74	227	50	A
06	2004-02-05	00:48	39.75	118.61	25.6	2.3	173	5	144	299	87	86	1.9	8.97	0.06	10 <sup>11</sup>	8.90	204	48	0.11	299	4	-9.03	33	42	B
07	2004-02-28	07:25	39.76	118.50	11.3	2.3	293	57	90	113	33	90	2.3	3.17	-0.4	10 <sup>12</sup>	3.57	204	78	-0.8	113	0	-2.77	23	12	B
08	2004-03-13	19:08	39.70	118.34	10.5	3.9	44	82	-125	303	36	-13	2.1	1.64	0.09	10 <sup>12</sup>	1.55	161	29	0.17	49	35	-1.72	280	42	B
09	2004-03-13	19:24	39.69	118.33	8.6	2.3	274	20	167	16	85	70	1.6	2.93	0.14	10 <sup>11</sup>	2.78	266	46	0.28	18	20	-3.07	124	37	B
10	2004-03-14	23:29	37.50	114.36	20.0	3.6	167	62	-91	350	28	87	2.7	1.25	-0.02	10 <sup>13</sup>	1.28	258	17	-0.04	168	1	-1.22	74	73	C
11	2004-03-15	15:49	39.74	118.40	8.4	3.4	26	57	-55	154	46	-131	1.6	3.42	0.92	10 <sup>11</sup>	2.50	92	6	1.84	185	28	-4.34	352	61	B
12	2004-03-17	15:28	39.69	118.32	10.0	2.1	347	35	115	137	58	73	0.9	3.06	-0.55	10 <sup>10</sup>	3.60	8	71	-1.10	146	14	-2.51	239	12	B
13	2004-03-17	21:49	39.70	118.35	6.0	2.0	136	14	40	7	81	101	1.3	9.97	1.39	10 <sup>10</sup>	8.57	289	53	2.79	185	10	-11.36	88	35	B
14	2004-03-18	15:10	39.70	118.34	7.7	2.0	262	16	-111	104	75	-84	1.2	7.22	0	10 <sup>10</sup>	7.21	189	30	0.01	282	6	-7.22	22	60	B
15	2004-03-25	01:40	39.69	118.33	8.1	2.1	118	81	-114	10	26	-20	1.2	7.65	-0.74	10 <sup>10</sup>	8.39	228	32	-1.48	122	24	-6.91	2	48	B
16	2004-03-27	13:15	39.44	118.08	10.0	2.3	277	22	-179	186	90	-68	1.4	1.54	0.01	10 <sup>11</sup>	1.53	256	41	0.02	6	22	-1.54	116	41	B
17	2004-04-05	17:03	41.10	117.39	9.7	2.1	198	31	93	15	59	88	1.3	10.7	10.74	10 <sup>10</sup>	10.39	279	76	0.69	15	2	-11.08	106	14	B
18	2004-04-18	00:18	38.78	114.07	11.5	2.0	180	75	-96	22	16	-68	0.9	2.88	-0.09	10 <sup>10</sup>	2.97	275	30	-0.18	181	6	-2.78	81	60	C
19	2004-04-23	16:32	41.11	117.40	10.7	2.3	189	51	-106	33	42	-71	1.4	1.48	-0.28	10 <sup>11</sup>	1.75	290	5	-0.55	199	12	-1.20	42	77	B
20	2004-04-27	04:12	39.62	114.91	10.7	2.1	49	25	10	310	86	115	1.5	2.02	0.09	10 <sup>11</sup>	1.93	245	44	0.18	129	25	-2.11	19	36	A
21	2004-05-05	08:55	39.37	117.70	20.0	2.9	131	4	-11	232	89	-94	3.1	5.8	0	10 <sup>13</sup>	5.79	325	44	0.01	232	4	-5.80	138	46	C
22	2004-05-24	15:03	37.40	114.65	10.0	3.6	156	39	-91	337	51	-89	2.3	3.9	-0.03	10 <sup>12</sup>	3.93	66	6	-0.06	156	1	-3.87	252	84	C
23	2004-05-24	20:11	37.41	114.43	10.0	2.4	353	70	92	168	21	86	1.2	8.57	0.06	10 <sup>10</sup>	8.62	266	65	-0.11	172	2	-8.51	82	25	C
24	2004-06-02	07:23	39.61	118.26	6.8	2.5	255	86	63	157	27	171	1.7	4.14	0.5	10 <sup>11</sup>	3.63	139	43	1	257	27	-4.64	8	35	B
25	2004-06-02	07:48	39.63	118.22	12.3	2.5	313	60	79	154	32	108	2.3	3.56	-0.01	10 <sup>12</sup>	3.57	195	73	-0.02	319	10	-3.55	51	14	C
26	2004-06-05	21:11	39.90	118.93	9.6	2.3	151	60	-82	315	31	-103	1.1	5.45	-0.07	10 <sup>10</sup>	5.52	235	14	-0.14	327	7	-5.38	81	74	B

续表 1

编 号	年-月-日	时:分	$\varphi_N/^{\circ}$	$\lambda_E/^{\circ}$	深度 /km	震级 $M_L$	节面 I			节面 II			$M_W$	$M_0$	CLVD	Exp/ N·m	T 轴			P 轴			B 轴			
							$\Phi/^{\circ}$	$\delta/^{\circ}$	$\lambda/^{\circ}$	$\Phi/^{\circ}$	$\delta/^{\circ}$	$\lambda/^{\circ}$					Ei	Az/ $^{\circ}$	Pl/ $^{\circ}$	Ei	Az/ $^{\circ}$	Pl/ $^{\circ}$	Ei	Az/ $^{\circ}$	Pl/ $^{\circ}$	
27	2004-06-08	11:33	38.01	113.78	29.1	2.0	243	89	66	151	24	177	1.7	4.63	0.24	10 <sup>11</sup>	4.39	131	41	0.47	244	24	-4.86	355	39	C
28	2004-06-16	14:44	39.19	114.45	10.9	2.1	127	88	69	31	21	174	1.4	1.85	0.03	10 <sup>11</sup>	1.82	17	43	0.06	128	21	-1.88	236	39	A
29	2004-06-23	16:21	39.78	116.46	11.8	2.2	119	43	-99	311	48	82	1.7	4.44	-0.31	10 <sup>11</sup>	4.75	35	3	-0.63	125	6	-4.12	282	83	C
30	2004-06-27	04:54	39.79	116.46	13.7	2.2	19	17	1	109	90	-107	2.1	1.57	0	10 <sup>12</sup>	1.57	215	42	0.01	109	17	-1.57	3	43	C
31	2004-06-30	12:34	39.46	115.58	10	2.7	246	27	105	49	64	82	1.4	1.80	0.05	10 <sup>11</sup>	1.75	304	70	0.09	53	7	-1.85	145	19	C
32	2004-07-03	22:40	38.72	118.60	24.2	2.0	56	35	-100	247	56	-83	1.3	9.61	0.57	10 <sup>10</sup>	9.04	333	11	1.15	64	5	-10.2	180	78	B
33	2004-07-23	09:17	37.58	114.94	20	3.5	311	89	-87	53	3	-168	2.6	1.07	0.11	10 <sup>13</sup>	9.96	38	44	0.22	131	3	-1.02	224	46	C
34	2004-07-23	21:47	39.62	118.22	10.1	2.3	349	64	-90	170	26	-90	1.3	1.08	0.05	10 <sup>11</sup>	1.04	79	19	0.09	349	0	-1.12	259	71	B
35	2004-07-30	11:45	39.75	118.82	9.8	2.4	173	79	36	75	55	166	1.2	8.42	-1.73	10 <sup>11</sup>	10.15	40	33	-3.46	188	53	-6.69	300	16	C
36	2004-08-03	03:20	37.64	114.93	30	2.2	121	90	74	31	16	180	1.9	7.89	-0.04	10 <sup>11</sup>	7.92	16	43	-0.07	121	16	-7.85	227	43	C
37	2004-08-17	19:15	39.40	117.94	20.2	2.1	186	50	101	350	41	77	2.0	1.41	0.10	10 <sup>12</sup>	1.31	148	80	0.20	359	8	-1.51	268	5	C
38	2004-08-18	02:19	39.39	117.96	21.6	2.2	350	43	78	185	48	101	2.2	2.40	0.17	10 <sup>12</sup>	2.23	161	82	0.33	358	8	-2.56	268	2	C
39	2004-08-24	08:45	40.09	116.32	6.7	2.0	53	80	100	189	14	47	1.4	1.34	-0.32	10 <sup>11</sup>	1.65	335	54	-0.63	232	9	-1.02	135	34	C
40	2004-09-01	09:53	40.37	114.96	10	2.3	149	74	-76	286	21	-130	1.8	5.96	-1.04	10 <sup>11</sup>	6.99	228	28	-2.08	325	13	-4.92	78	58	B
41	2004-09-03	19:32	37.55	114.90	20	2.6	196	59	145	306	61	37	1.4	1.71	-0.22	10 <sup>11</sup>	1.93	162	45	-0.45	339	45	-1.49	71	2	C
42	2004-09-13	22:49	39.88	118.78	9.9	2.0	257	14	80	87	76	92	1.1	5.98	0.36	10 <sup>10</sup>	5.62	0	59	0.72	267	2	-6.34	175	31	B
43	2004-09-15	04:31	39.73	118.74	11.7	2.1	131	30	103	296	60	83	1.2	8.38	1.63	10 <sup>10</sup>	6.75	187	74	3.25	300	6	-10	31	15	B
44	2004-09-26	02:42	39.80	118.49	10.7	2.5	124	68	84	320	23	105	1.6	2.88	0.29	10 <sup>11</sup>	2.59	23	66	0.57	126	6	-3.16	219	23	B
45	2004-10-10	01:41	39.78	118.75	29.7	2.1	214	64	130	332	46	38	1.3	1.06	-0.15	10 <sup>11</sup>	1.20	173	53	-0.30	13	35	-0.91	276	10	A
46	2004-10-11	22:03	39.60	118.10	9.9	2.9	27	75	77	249	20	130	1.9	1.01	-0.03	10 <sup>12</sup>	1.03	280	58	-0.05	31	12	-1.00	128	29	B
47	2004-10-14	11:29	39.80	118.70	20.8	2.3	294	85	89	129	6	105	1.5	2.39	-0.03	10 <sup>11</sup>	2.42	202	50	-0.06	294	1	-2.36	25	40	B
48	2004-10-15	04:51	40.53	115.59	15.5	2.3	91	55	-138	334	57	-44	1.4	5.83	-0.23	10 <sup>10</sup>	6.06	33	1	-0.46	124	37	-5.60	301	53	A
49	2004-10-25	01:55	39.74	118.64	11.3	2.1	38	41	-118	254	54	-68	1.3	9.59	-1.06	10 <sup>11</sup>	10.65	328	7	-2.11	60	18	-8.54	218	71	C
50	2004-11-12	11:53	39.57	118.14	11.7	2.0	255	17	108	56	74	85	1.6	3.12	0.26	10 <sup>11</sup>	2.86	318	61	0.51	57	5	-3.37	150	29	B
51	2004-12-04	01:32	39.66	118.77	9.8	2.9	110	15	-83	283	75	-92	2.1	1.58	-0.02	10 <sup>12</sup>	1.60	15	30	-0.04	284	2	-1.56	191	60	B

注:  $\Phi$  表示断层走向;  $\delta$  表示断层倾角;  $\lambda$  表示断层滑动角; CLVD 表示断层滑动的纯压缩分量; Exp 表示各项同性分量; Ei 表示特征主值; Az 表示方位角; Pi 表示仰角; QL 表示反演结果等级。

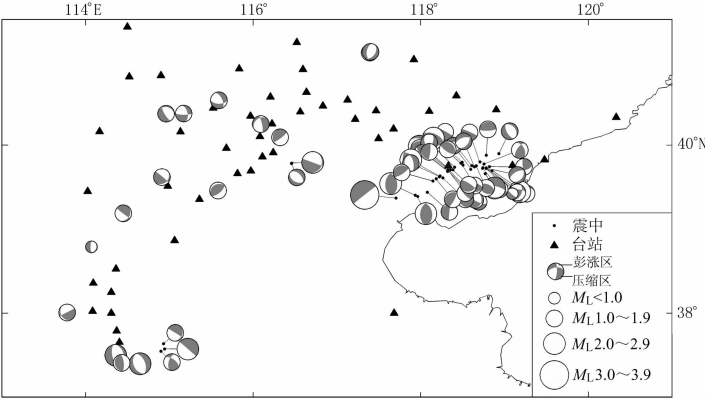


图 4 首都圈地区的宽频带地震台分布以及 2004 年 1 月—2005 年 1 月发生的  $M_L > 2.0$  的 51 次地震的震中分布及其震源机制解的“海滩球”表示(震源球下半球投影)

4 台站方位覆盖与台站数目对反演结果的影响

众所周知,地震矩张量的反演结果受观测台站方位覆盖的影响,也受观测台站数目的影响.为此,我们进行了必要的数值试验,考察了台站的方位覆盖以及台站数目对矩张量反演结果——震源机制的影响,同时也考察了在 10% 随机噪声存在的情况下,台站的方位覆盖或台站的数目对结果的影响.

我们假设断层走向和倾角及滑动角都是  $45^\circ$ 、震源深度为 10 km 的地震点源,计算震中距为 80 km,方位角分别为  $0^\circ, 23^\circ, 45^\circ, 67^\circ, 90^\circ, 113^\circ, 135^\circ, 158^\circ, 180^\circ, 203^\circ, 225^\circ, 247^\circ, 270^\circ, 293^\circ, 315^\circ$  和  $337^\circ$  的“观测点”的地震图,同时为每个观测点计算格林函数,然后在不同的台站方位覆盖、不同的台站数目以及为观测地震图添加随机噪声的情况下实施矩张量反演.表 2 给出了该试验结果.其中,试验 1 是无噪声情况下的结果,试验 2 是有噪声情况下的结果.

试验 s010203, s050607, s091011 和 s131415 是在 3 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $45^\circ$  情况下的结果;试验 s010407, s050811, s091215 和 s131603 是在 3 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $135^\circ$  情况下的结果;试验 s010511, s050915, s091303 和 s130107 是在 3 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $225^\circ$  情况下的结果;试验 s010814, s051202, s091607 和 s130412 是在 3 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $293^\circ$  情况下的结果.从试验结果可以看出,无论观测点相对于事件的方位如何,无论观测点相对于事件的张角是多大( $45^\circ, 135^\circ, 225^\circ$  或  $293^\circ$ ),3 个观测点的资料足以确定事件的震源机制(误差不超过  $3^\circ$ ),即使在 10% 的随机噪声存在的情况下也是如此.

试验 s01020304, s03040506, s05060708 和 s07080910 是在 4 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $67^\circ$  情况下的结果;试验 s0102030405, s0304050607, s0506070809 和 s0708091011 是在 5 个台站相对于事件的方位角不同而张角都为  $90^\circ$  情况下的结果.从试验结果可以看出,增加观测点可以更好地稳定反演结果;而且,观测点越多,随机噪声对结果的影响也越小.

由于即使在 3 个观测点且张角为  $45^\circ$  情况下,反演结果依然可靠稳定,所以在 4 个和 5 个观测点情况下,我们只测试了张角为  $67^\circ$  和  $90^\circ$  的情形.



表 2 台站方位覆盖等因素对矩张量反演结果影响的评价试验结果

代码	台站张角/°	试验 1			试验 2		
		走向/°	倾角/°	滑动角/°	走向/°	倾角/°	滑动角/°
s010203	45	47	43	44	46	43	44
s050607	45	43	47	45	44	47	45
s091011	45	47	46	46	47	46	46
s131415	45	44	44	45	45	44	45
s010407	135	45	45	45	45	45	44
s050811	135	46	46	46	46	47	47
s091215	135	46	45	47	46	45	47
s131603	135	45	44	45	45	43	45
s010511	225	46	44	45	46	44	45
s050915	225	46	45	46	46	44	46
s091303	225	45	46	46	45	46	45
s130107	225	44	46	45	44	45	44
s010814	293	43	46	43	42	46	42
s051202	293	46	44	45	46	44	45
s091607	293	45	45	45	46	45	46
s130412	293	46	45	46	46	45	46
s01020304	67	46	43	45	46	43	45
s03040506	67	45	45	45	45	45	45
s05060708	67	45	47	46	46	46	46
s07080910	67	46	47	47	46	47	47
s0102030405	90	45	44	45	45	44	45
s0304050607	90	45	46	45	45	46	45
s0506070809	90	45	47	46	45	47	46
s0708091011	90	46	47	47	46	47	47

5 讨论和结论

本研究的主要目的是通过反演首都圈地区宽频带数字地震波形资料，确定 2004 年发生在该地区的中小地震的矩张量解，由此确定这些地震的标量地震矩、矩震级、双力偶分量和补偿线性矢量偶极分量的大小以及断层面参数和应力轴参数。

为了避免首波的影响，我们只选择了初至震相为直达 P 波的记录资料。同时，为了反演结果的稳定与可靠，我们只挑选了同时被 3 个以上台站记录清楚的地震事件。在 2004—2005 年发生的众多地震事件中，只有 51 次地震满足上述条件。

通过矩张量反演，我们得到了这 51 次地震的矩张量解。通过进一步的分解与计算，得到了这些地震事件最佳双力偶解、应力轴参数、标量地震矩、补偿线性矢量偶极成分、矩震级。

为了检验反演结果的可信度，针对观测台站相对于地震事件的方位分布、观测台站相对于地震事件的方位覆盖、以及随机噪声对反演结果的影响，我们设计了必要的数值试验。结果表明：① 张角大于 45°的 3 个或 3 个以上的台站足以确定震源机制；② 台站张角越大，结果误差越小；③ 台站数目越多，结果误差越小；④ 台站数目越多，随机噪声对结果的影响越小。因此，我们选择同时被 3 个或 3 个以上的台站记录到的地震事件进行矩张量反演是正确的。

尽管同时被 3 个或 3 个以上的台站记录的地震事件的矩张量反演结果是稳定可靠的,但考虑到台站张角越大结果误差越小,台站数目越多结果误差越小,以及台站数目越多随机噪声对结果的影响越小的数值试验结果,我们根据台站相对于地震事件的方位角张角  $\theta$  的大小,对反演结果进行了分类: A 类:  $\theta \geq 180^\circ$ ; B 类:  $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ ; C 类:  $\theta < 90^\circ$ . 在表 1 中,我们对每次地震的类别也做了标注,供使用时参考.

本工作所用的资料系由北京数字遥测地震台网提供,特此致谢.

### 参 考 文 献

- 许力生, 陈运泰. 2004. 格林函数库技术与快速地震矩张量反演[G]//陈运泰, 滕吉文, 阚荣举, 等主编. 中国大陆地震学与地球内部物理学研究进展: 庆贺曾融生院士八十寿辰. 北京: 地震出版社: 625-630.
- 中国地震局震害防御司. 1992. 地震工作手册[M]. 北京: 地震出版社: 1-633.
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制[J]. 地震学报, **23**(5): 492-501.
- Frohlich C, Davis S D. 1993. Teleseismic  $b$  values; or, much ado about 1.0[J]. *J Geophys Res*, **98**: 631-644.
- Gilbert F, Dziewonski A M. 1975. An application of normal mode theory to the retrieval of structural parameters and source mechanisms from seismic data[J]. *Phil Trans R Soc London, Ser A*, **278**: 187-269.
- Kawakatsu H. 1991. Enigma of earthquakes at ridge-transform-fault plate boundaries: distribution of non-double couple parameter of Harvard CMT solutions[J]. *Geophys Res Lett*, **18**: 1 103-1 106.
- Kagan Y Y. 1997. Seismic moment-frequency relation for shallow earthquakes: Regional comparison[J]. *J Geophys Res*, **102**: 2 835-2 852.
- Kagan Y Y. 2000. Temporal correlations of earthquake focal mechanisms[J]. *Geophys J Int*, **143**: 881-897.
- Kennett B L N. 1983. *Seismic Wave Propagation in Stratified Media*[M]. Cambridge: Cambridge University Press: 1-339.
- Kubo A, Fukuyama E. 2003. Stress field along the Ryukyu Arc and the Okinawa Trough inferred from moment tensors of shallow earthquakes [J]. *Earth Planet Sci Lett*, **210**: 305-316.
- McKenzie D P. 1969. The relationship between fault plane solutions for earthquakes and directions of principal stresses [J]. *Bull Seism Soc Amer*, **59**: 591-601.
- Patton H, Aki K. 1979. Bias in the estimate of seismic moment tensor by the linear inversion method[J]. *Geophys J R astr Soc*, **59**: 479-495.
- Reasenber P A. 1999. Foreshock occurrence before large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **104**: 4 755-4 768.
- Sornette D, Knopoff L, Kagan Y Y, et al. 1996. Rank-ordering statistics of extreme events: Application to the distribution of large earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **101**: 13 883-13 893.
- Tanimoto T, Okamoto T. 2000. Change of crustal potential energy by earthquakes: An indicator for extensional and compressional tectonics[J]. *Geophys Res Lett*, **27**: 2 313-2 316.
- Tapponnier P, Molnar P. 1976. Slip-line field theory and large scale continental tectonics[J]. *Nature*, **264**: 319-324.
- Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. 1992. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **97**(B8): 11 867-11 877.
- Zoback M D, Zoback M L, Mount V S, et al. 1987. New evidence on the state of stress of the San Andreas fault system [J]. *Science*, **238**: 1 105-1 111.

## MOMENT TENSOR INVERSION OF THE 2004 SMALL-MODERATE SIZE EARTHQUAKES IN THE CAPITAL REGION

Xu Lisheng Jiang Changsheng Chen Yuntai Li Chunlai Zhang Tianzhong

*(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)*

**Abstract:** The moment tensor solutions of 51 small-moderate size earthquakes occurred in the Capital Region in the year of 2004 are obtained by inverting the broadband waveform data. Accordingly, other source parameters, such as scalar seismic moments, moment magnitudes, double-couple components and compensated-linear-vector-dipole components, are determined as well as fault parameters and stress-axis parameters. The inverted results are evaluated by groups of numerical tests.

**Key words:** Capital Region; small-moderate size earthquakes; moment tensor inversion

地震学  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA