

文章编号: 0253-3782(2003)04-0351-10

2001 年四川雅江 6 级地震的前震与 余震震源参数的变化^{*}

程万正 陈天长 魏娅玲 朱 航

(中国成都 610041 四川省地震局)

摘要 研究了 2001 年 2 月四川省雅江县发生的 $M_s 5.0$ 前震、 $M_s 6.0$ 主震及序列地震的震源机制、波谱参数及应力降的变化过程与震区地震活动。根据雅江地震的震源机制解, 并结合余震空间分布图象分析, 选雅江 5.0 级的节面 I 为推测的地震断层, 走向 NNE; 选雅江 6.0 级地震的节面 II 为推测的地震断层, 走向 WNW, 分析前震与主震的断层面走向是斜交的。雅江 6.0 级地震发生前震区应力降水平有所增加, 这一现象与震区地震活动的增加是一致的。雅江地震序列的衰减起伏过程, 前、余震波谱变化, 以及震源力学错动机制等均呈现复杂特征。

关键词 雅江地震 序列特征 震源参数

中图分类号: P315.3 **文献标识码:** A

引言

2001 年 2 月 23 日四川省雅江县发生 $M_s 6.0$ 地震。雅江地震发生在 NW 向理塘—德巫断裂南东段的东侧地区。雅江 $M_s 6.0$ 地震发生前, 即 2001 年 2 月 14 日在震区曾发生 $M_s 5.0$ 地震。

1948 年理塘断裂北西段曾发生 7.3 级地震, 宏观破裂尺度达 70 km, 破裂区从理塘—德巫展布(黄彩权, 1983)。该断裂南东段仅发生过几次 5 级地震。据地质踏勘和地震资料分析, 地震活动水平和活动构造形迹南东段相对北西段要弱, 同时也构成新区发生中强地震的有利条件。据史料记载, 1927 年 7 月 3 日雅江南发生过 5.5 级地震; 1987 年 8 月 7 日距雅江 5 级地震震中 20 km 的理塘断裂南段的日乃附近也发生过 5.7 级地震。雅江震区未曾发生过 6.0 级以上的地震。

有地震观测台网以来理塘、雅江地区地震稀少。2001 年雅江 6.0 级地震的前震、余震十分丰富, 持续时间长。雅江 6.0 级地震后, 四川省地震局在雅江县城和道孚县的新都桥镇增加了 5 个流动地震台, 对余震的测定起了较好的作用。本文利用 P 波初动和观测振幅资料, 联合测定了雅江 6.0 级地震的前震、余震的震源机制解, 并对震区应力场及其它震源参数的变化给出研究结果。

* 国家重点基础研究发展项目《大陆强震机理与预测》(95130505)子课题资助。
2002-07-10 收到初稿, 2002-12-30 收到修改稿, 2003-03-05 决定采用。

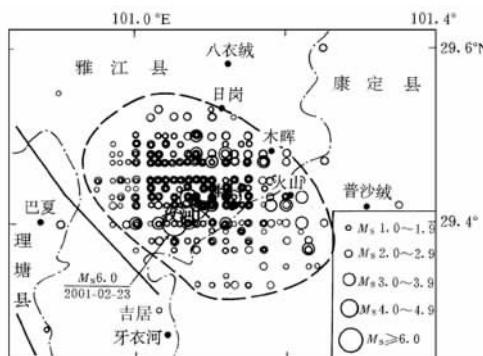


图 1 雅江 6.0 级地震序列震中分布图
(2001 年 2 月 23 日 ~ 2001 年 6 月 30 日)

康定县交界一带(图 1). 余震区大体呈 $N50^{\circ}W$ 走向长椭圆形, 与 NW 向理塘—德巫断裂走向一致. 余震展布在该断裂带南东段的东侧. 椭圆形余震区的长轴约 33 km, 短轴约 20 km.

表 1 雅江地震序列

序号	时间		震中位置 φ_N	λ_E	震级 M_L	深度 /km
	年-月-日	时:分:秒				
1	2000-10-15	04:13:07.0	29°24'	101°05'	3.1	11
2	2000-12-28	03:54:30.2	29°24'	101°05'	3.2	5
3	2001-01-02	00:24:03.6	29°24'	101°07'	3.0	9
4	2001-01-06	07:20:10.5	29°25'	101°05'	3.0	
5	2001-01-09	13:05:02.2	29°27'	101°05'	3.4	
6	2001-02-12	20:44:50.1	29°24'	101°07'	3.3	10
7	2001-02-14	15:27:28.2	29°24'	101°05'	5.0	8
8	2001-02-14	15:39:59.9	29°25'	101°05'	3.0	3
9	2001-02-14	16:24:47.9	29°24'	101°04'	3.3	5
10	2001-02-23	08:09:19.8	29°25'	101°06'	6.0	6
11	2001-02-25	07:42:40.1	29°25'	101°05'	3.0	5
12	2001-02-25	14:57:26.9	29°24'	101°07'	3.0	12
13	2001-02-26	06:44:03.4	29°24'	101°02'	3.0	10
14	2001-02-27	22:21:48.4	29°25'	101°04'	3.2	5
15	2001-03-01	13:19:54.5	29°25'	101°11'	3.5	
16	2001-03-11	22:32:04.2	29°24'	101°04'	3.5	
17	2001-03-12	10:16:46.9	29°29'	101°07'	3.0	9
18	2001-03-30	19:26:28.2	29°28'	101°06'	3.0	16
19	2001-04-04	18:55:26.9	29°28'	101°06'	3.4	
20	2001-04-06	13:02:07.8	29°29'	101°05'	3.6	
21	2001-05-05	18:41:09.2	29°28'	101°10'	3.0	5
22	2001-05-31	11:22:41.0	29°26'	101°13'	3.0	2
23	2001-06-03	44:53:00.3	29°24'	101°00'	3.1	
24	2001-06-07	06:59:23.2	29°22'	101°14'	3.0	8
25	2001-06-07	16:26:51.5	29°26'	101°08'	3.2	

雅江 6.0 级地震前, 2001 年 2 月 14 日震区曾发生 $M_s 5.0$ 地震, 震中位置: $29^{\circ}24'N$,

1 雅江 6 级地震和震区地震活动

根据四川地震台网观测资料, 对雅江地震的前、余震震中位置采用相对定位方法重新测定(表 1). 雅江 6.0 级地震后新增流动地震台, 对其余震的测定增加了流动地震台的观测资料. 选择相对定位方法测定雅江地震序列参数, 优于其它方法及减少对台网分布的依赖. 2001 年 2 月 23 日 08 时 09 分, 四川省雅江县发生 6.0 级地震, 震中位置: $29^{\circ}25'N$, $101^{\circ}06'E$, 震源深度 6 km. 雅江 6.0 级地震的余震分布在雅江县的孜河区、雨日乡至

101°05'E, 震源深度8 km. 雅江5.0级前震序列中, 1.0级以上地震136次, 计算这次5.0级前震序列的日频度衰减系数P值为0.94. 雅江5.0级前震序列频度相对较高, 强度低, 时间序列分布表现均匀, 计算的序列参数b值、容量维 D_0 值、衰减系数P值均较低.

尽管雅江5.0级和6.0级地震序列空间上分布范围均较窄, 但在6.0级地震前后的两个时间段, 地震空间分布图象有所不同. 雅江5.0级地震前后小地震活动从较大范围缩小到较小范围展布. 雅江5.0级地震的余震分布在雅江县的孜河区往北至日岗乡, 往南至康定县的吉居乡, 在震区形成SN方向条带状, 展布长度约17 km(图2).

从2000年10月1日~2001年6月30日, 雅江地震前震和余震序列共记录到地震2 695次, 震源深度大多集中在5~10 km, 最深17 km. 震源深度随时间变化表明, 从浅层到17 km地震均有发生(图3), 仅在5.0级和6.0级地震震中附近更为密集. 雅江地震活动的时-空总体分布图象表明, 前震序列呈SN方向带状分布, 主震序列却呈现WNW方向椭圆形扩展. 两者扩展走向呈斜交.

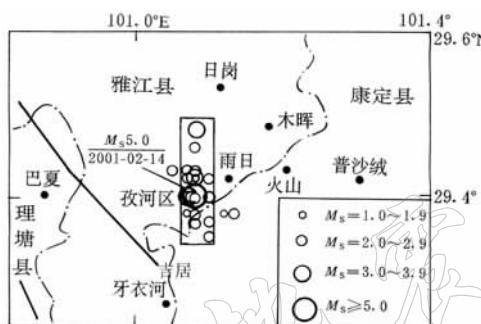


图2 2001年2月14日雅江5.0级地震序列震中分布图
(2001年1月14日~2001年2月22日)

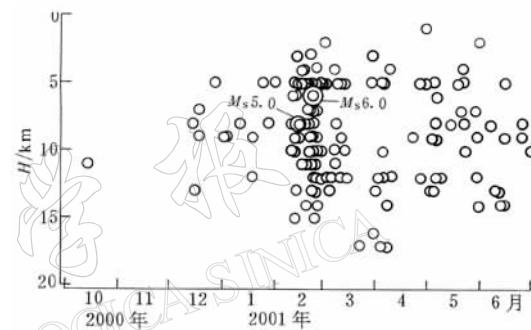


图3 雅江地震序列震源深度随时间的变化

重新测定的雅江震区地震, 仅列出其中2000年10月~2001年6月3.0级以上的地震(表1). 雅江5.0级地震的最大余震为3.3级, 6.0级主震的最大余震为3.6级. 雅江5.0级地震前震区50 km范围内的小震活动, 从2000年12月中旬开始略有增加, 至2001年1月底相对较活跃(图4). 雅江5.0级地震前出现半个月2.0级以上地震的短暂平静. 雅江6.0级主震前的震区地震活动频度短期略有增加, 强度明显增强, 并发生了5.0级前震. 因此, 雅江6.0级地震是在震区小震活动短期出现活跃迹象的背景下发生的. 但是, 若分别计算前震与主震序列活动参数, 对比分析结果则两者差异小(程万正, 2002). 雅江6.0级主震后震

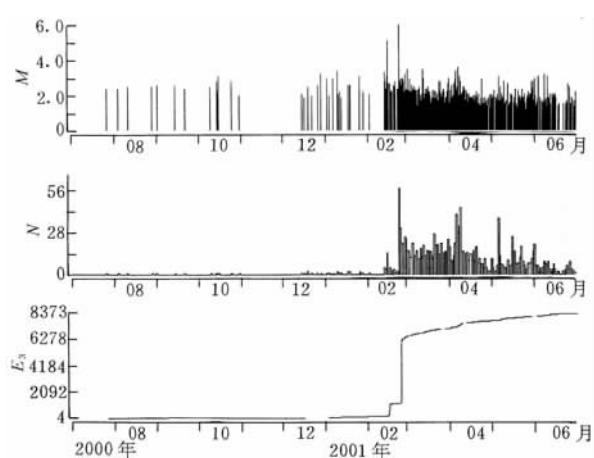


图4 雅江地震时间序列
(a) M_t 图; (b) N_t 图; (c) 蠕变曲线

区地震活动总体呈衰减势态, 地震频度降低, 蠕变曲线走势逐渐变缓。因此, 这次雅江 6.0 级地震属前震-主震-余震型。

2 雅江地震的震源机制解

2.1 雅江 5.0 级和 6.0 级地震的震源机制解

一次地震若有足够多的台站记录到清晰的 P 波初动, 并在震源球上有完整的角分布时, 可以获得此次地震可靠的震源机制解。根据四川地震台网记录的初动符号, 雅江 5.0 级地震采用 55 个、雅江 6.0 级地震采用 58 个地震波初动符号, 利用编制的 P 波初动求解震源机制解的程序获得它们的震源机制解。该程序用格点尝试法将震源模型取震源球空间上各种可能取向, 使观测的 P 波初动方向与理论初动分布的矛盾数最小。最后, 选最佳的一组模型, 计算震源机制解的有关参数。

求得的雅江 5.0 级和 6.0 级地震的震源机制解(表 2)、矛盾符号比均很低。其震源机制解结果十分接近, 前者主压应力方位 N67°E, 后者 N68°E, 为 ENE 方向。节面 I 走向 NNE 或近 SN, 倾向 SE, 倾角较陡; 节面 II 走向 ESE 或 WNW, 倾向 SW, 倾角较陡。

若结合定位较好的余震空间集中分布区图象分析, 对雅江 5.0 级选表 2 中节面 I, 初步推测地震断层面与走向呈近 SN 方向的节面较吻合。对雅江 6.0 级地震选表 2 中节面 II, 初步推测地震断层面与走向呈 WNW 的节面较吻合。雅江 5.0 级和 6.0 级地震是在近水平力作用下产生的近走滑错动, 兼有一定的逆冲分量。分析雅江 5.0 级前震的断层走向呈近 SN 方向, 雅江 6.0 级地震的断层走向呈 WNW 方向, 两次地震的断层面走向是斜交的。更细致地刻画有待进一步的研究工作才能判定。

表 2 2001 年雅江 5.0 级和 6.0 级地震的 P 波初动解(下半球投影)

时间 月-日	震 级	节面 I			节面 II			P 轴			T 轴			N 轴			X 轴			矛盾符 号比
		走 向	倾 向	倾 角																
02-14	5.0	19°	SE	70°	116°	SW	72°	247°	1°	338°	28°	154°	62°	289°	20°	26°	18°	7/55		
02-23	6.0	19°	SE	75°	115°	SW	69°	68°	4°	336°	26°	166°	64°	289°	15°	25°	21°	2/58		

2.2 前、余震序列的震源机制解

用 P 波初动确定小地震的震源机制解的困难, 往往是无法获得震源球上良好的 P 波初动角分布, 以及初动不可靠或者仪器极性不正确带来的混淆。对小地震用可靠的较少的初动资料和相对较多可以得到的波形记录, 联合测定震源机制可以改善这一状况。对于雅江地震前震和余震, 地震波形记录是短周期的, 由于震级仅 3 级左右, 震中偏离台网, 有的地震台偏离较远, P 波初动资料不够。

Kisslinger (1980) 以及 Julian 和 Foulger (1996) 提出了利用 P, S 波振幅比确定震源机制解的方法, 假设当 P, S 波速度比 (v_p/v_s) 是常数时, 振幅比与速度结构的变化无关。理论上拓展了其应用意义。对于频率高于几赫的地震波振幅, 对地震波传播途径上的速度和 Q 值结构的三维变化是相当敏感的。Schwarth (1995) 提出了利用初动资料和对速度结构的变化不灵敏的地震包络振幅, 但地震包络振幅仍与传播路径上的 Q 值以及地表的 P, S 波速度结构有关。因此, 使用短周期地震波振幅测定震源机制的一个关键, 是如何恰当处理

传播途径上的不均匀性。

据 Nakamura 等(1999)的观点, 仅研究一个小区域的地震震源机制解, 可以假设这些地震的震源到某个地震台站的路径几乎相同, 即 P 波、S 波沿这些路径上的衰减与震源位置无关。利用 P 波初动和 P, S 波短周期地震波振幅, 可以同时测定许多地震的震源机制解以及 P, S 波沿射线路径的衰减。这种方法适用于震中距较震源尺度与 P, S 波波长大得多的情况。

当周围台站的震中距比震源范围大得多时, 可确定在这个小范围内地震的震源机制。假定由震源到观测台的 P 波或 S 波的总衰减, 包括场地效应几乎相同。利用初动和观测振幅资料进行反演时, 采用观测振幅和模型振幅对数的残差, 用振幅和初动资料联合确定未知参数。陈天长等(2001)根据这种思想编制了利用 P 波初动和短周期 P, S 波振幅联合测定地震震源机制解和应力场的计算程序。利用此程序, 计算了 2001 年雅江震区发生的 6.0 级地震及前震、余震的震源机制解(表 3)。

表 3 用 P 波初动和振幅联合测定的雅江地震序列的震源机制解

序号	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		N 轴		X 轴		Y 轴	
	走向 / (°)	倾向 / (°)	倾角 / (°)	走向 / (°)	倾向 / (°)	倾角 / (°)	Az / (°)	Z / (°)								
1	220.3	NW	46.4	41.4	SE	43.6	109.1	1.6	310.8	88.6	220.8	89.4	311.4	43.6	130.3	46.5
2	121.9	SW	89.7	31.9	SE	89.7	76.9	90.0	346.9	89.5	170.8	0.5	301.9	89.7	31.9	89.7
3	0.9	E	86.5	90.9	S	89.6	316	87.3	225.9	87.8	97.7	3.5	0.9	89.6	270.9	86.5
4	337.8	E	90.0	247.8	N	90.0	292.8	90.0	202.8	90.0	0.0	0.0	337.8	90.0	247.8	90.0
5	275.6	N	20.6	64.4	SE	72.2	318.7	28.6	162.7	63.6	67.6	80.0	334.4	72.2	185.6	20.6
6	153.8	SW	45.9	354.6	E	46.0	74.2	90.0	344.1	10.6	164.2	79.4	264.6	46.0	63.8	45.9
7	300.1	NE	89.3	210.0	NW	89.6	255.1	89.8	165.1	89.2	1.4	0.9	120.0	89.6	210.1	89.3
8	274.3	N	78.4	181.6	W	77.0	47.8	89.1	138.1	72.5	314.9	17.6	91.6	77.0	184.3	78.4
9	96.6	S	47.6	277.5	N	42.5	356.7	2.6	187.0	87.4	97.0	89.5	187.5	42.4	6.6	47.6
10	295.7	NE	89.4	205.8	NW	89.5	250.8	89.9	160.7	89.2	345.0	0.8	115.8	89.5	205.8	89.4
11	2.6	E	87.8	272.6	N	89.4	317.6	88.9	227.6	88.0	77.7	2.3	182.6	89.4	272.6	87.8
12	10.9	E	42.5	192.7	W	47.5	122.0	2.6	281.9	87.5	11.9	89.1	102.8	47.5	280.9	42.5
13	205.9	NW	85.9	296.3	NE	84.3	161.0	83.1	251.1	88.9	350.5	7.0	206.3	84.3	115.9	85.9
14	189.7	W	46.2	11.6	E	43.8	280.6	88.8	61.6	1.5	190.6	89.0	281.6	43.8	99.7	46.2
15	164.1	W	47.6	332.5	NE	43.0	137.0	6.2	248.5	87.7	338.8	84.2	242.5	43.0	74.1	47.6
16	347.4	E	43.6	162.9	W	46.5	17.9	2.7	255.1	88.5	165.0	87.7	72.9	46.5	257.4	43.6
17	202.9	NW	70.9	306.3	NE	56.2	160.0	51.4	257.5	80.7	358.7	40.2	216.3	56.2	112.9	70.9
18	353.4	E	45.2	155.7	SW	46.1	347.4	8.9	254.5	89.5	164.4	81.1	65.8	46.1	263.4	45.2
19	270.7	N	36.1	85.0	S	54.0	340.4	9.4	177.4	81.0	87.0	87.3	355.0	54.0	180.7	36.1
20	193.5	W	45.4	22.9	SE	45.0	288.2	89.8	20.6	4.7	198.2	85.3	292.9	45.0	103.5	45.4
21	47.2	SE	43.5	226.7	NW	46.5	316.9	88.5	128.1	1.5	226.9	89.8	136.7	46.5	317.2	43.5
22	40.0	SE	88.7	130.1	SW	88.5	355.0	88.0	85.0	89.8	180.0	2.0	40.1	88.5	310.0	88.7
23	76.0	S	44.6	250.9	N	45.6	343.4	89.5	84.6	2.6	253.4	87.5	160.9	45.6	346.0	44.6
24	65.1	SE	45.7	241.5	NW	44.4	43.5	2.0	153.3	89.3	243.3	88.2	151.5	44.4	335.1	45.7
25	1.7	E	44.8	170.0	W	45.8	0.2	5.9	265.8	89.5	175.8	84.1	80.0	45.8	271.7	44.8

注: 表中序号地震的基本参数同表 1。Az 为方位角, 以北顺时针计算; Z 是以垂直由下往上算的角度。

对于雅江震区的地震, 所用的 11 个短周期记录台站对震中的角分布只在震源球四分之一的角分布内, 而且离震中的距离大, 有的台站记录的信噪比不高。但可以用 2001 年 2 月 14 日雅江 5.0 级地震和 2001 年 2 月 23 日雅江 6.0 级地震的资料, 对比两种方法测定的

结果. 求 P 波初动解时, 对雅江 5.0 级、6.0 级地震分别使用了 55 个、58 个初动符号. 用 P 波初动和振幅联合测定震源机制解时, 对雅江 5.0 级地震使用了 8 个测震台记录的初动符号, 11 个测震台记录的 P, S 波的振幅资料; 雅江 6.0 级地震使用了 10 个测震台记录的初动符号, 11 个测震台记录的 P, S 波的振幅资料.

此外, 在用 P 波初动和数字波形的振幅资料联合测定震源机制的方法中, 逐步减少 P 波初动符号数, 观察其震源机制解的计算结果, 发现对雅江 5.0 级地震, 到保留其中 2 个 P 波初动符号时, 其结果基本相同; 对雅江 6.0 级地震, 到保留其中 4 个 P 波初动符号时, 其结果基本相同. 因此, 其计算结果是较稳定的. 表 3 中给出的结果是可以参考使用的.

同时应指出, 表 3 中除序号 7 和 10 地震外, 其它序号地震震级在 3.0~3.6 之间, 部分小地震由于近台资料的缺乏, P 波初动解给出的结果可能存在震源机制节线的摆动范围可能增大. 但是, 用 P 波初动和振幅联合测定震源机制解的方法有助于部分克服这一缺点. 尽管力求如此, 有时对震源机制解中节面的倾角、倾向的控制仍比较差, 这对震源应力场的综合计算结果可能会有影响.

2.3 由多个地震破裂面求得震源应力场的变化

同一震区多个地震的震源机制解的 P 轴方向, 在各个时间段是有差异的, 分布可能是不一致的. 但震区存在主应力的优势方向是肯定的. 如何通过多个地震的震源机制解计算震区应力场优势方位及得到不同时间段的动态方位变化, 这本身是一个需要探讨的问题. 为得到其动态结果, 据 Gephart 和 Forsyth(1984)提出的利用震源机制数据确定震区应力场的思路, 即假设某区域的偏应力张量是均匀的, 设法寻求 3 个主应力方向和表征相对大小的量. 在编制的计算程序中, 采用格点搜索法求 3 个主应力方向和位错矢量, 并将这个位错矢量与观测位错比较. 由于震源机制解中两个节面无法判断哪个是断层面, 因而将两个节面都作比较, 将两个差别中较小的一个考虑为断层面. 这样, 寻找一个最佳拟合的应力模型, 使观测位错方向与理论的位错方向差别最小.

为此, 将表 3 中地震震源机制解分成两个时间段处理, 即雅江 6.0 级地震前、后两个时间段. 将前段为序号 1~9 号的震源机制解结果, 后段为序号 11~25 号的震源机制解结果分别计算, 得到震区在前后两个时段震源均匀应力场的优势方向(表 4). 可见, 雅江震区在 6.0 级地震前、后压应力场的优势取向变化较大. 震前, 主压应力方位是近 SN 向的; 震后是 NWW 方位的. 这与雅江 5.0 级和 6.0 级地震的余震扩展方向大体一致. 也就是说, 在雅江 6.0 级地震前后两个时段, 雅江震区的拟合震源应力场的主压应力方向分别发生系列地震破裂. 据此资料推断, 震源应力场的压应力方位在 6.0 级地震前后发生了偏转, 偏转约 74°.

表 4 由多个地震震源机制解对雅江 6.0 级地震前、后震区应力场的最佳拟合结果

时 段	主压应力轴		中等主应力轴		主张应力轴	
	Az/(°)	Z/(°)	Az/(°)	Z/(°)	Az/(°)	Z/(°)
6.0 级地震前	355.06	116.04	270.00	80.00	199.23	151.83
6.0 级地震后	101.25	80.00	42.65	161.30	188.42	105.63

注: Z 和 Az 是角射线坐标. Az 为方位角, 以北顺时针计算; Z 是以垂直由下往上算的角度.

须说明的是, 根据多个地震破裂面求取震源均匀应力场的优势方位的研究思路和算法, 给出的是一定时间段内震区多个破裂面确定的主应力方位, 不取决于该时间段内某一

较大地震的 P 轴方向. 它只表示该时间段内拟合多个破裂面上地震错动方向给出的均匀应力场最佳优势取向的结果.

3 前、余震震源波谱和应力降的变化

利用小震波形记录资料, 研究微震波谱是目前获得中强震前后震源区应力状态与孕震状态变化的重要手段之一.

地震体波波谱在双对数坐标里可用两条渐近线, 即波谱长周期部分水平线和高频部分衰减线来逼近. 两条渐近线交点所对应的频率称为体波拐角频率 f_c . 体波位移谱的长周期部分的高度与地震矩成正比, 其高频端的波谱拐角频率与震源尺度成反比. 为了克服大量中小震波记录中仪器和介质条件的影响, 我们选择同一震区的系列地震在同一台网的记录进行分析和比较. 针对各台对同一震区的不同地震记录而言, 其路径和场地及介质条件是相同的, 在频率域内地震记录的振幅是地震震源传播介质效应、仪器响应和观测点场地效应的乘积, 扣除介质中衰减和仪器响应后, 采用 Sato 和 Hirasawa(1973) 提出的拟合公式得到谱参数.

选取雅江震区成都数字遥测地震台网记录的地震, 取 Pn , Pg , Sg 波段的多台数字波形记录, 各地震波段(Pn , Pg , Sg)作波谱计算时取 128 个点, 计算后给出 65 个频率点的谱值.

根据 Silver(1983) 导出的波、波位移振幅谱全方位上的平均拐角频率 \bar{f}_c 与震源破裂尺度的关系式, 首先求得单次地震全方位多台平均拐角频率、震源的等效圆形破裂面的半径、应力降.

区域地震体波不同波段得到的平均拐角频率 \bar{f}_c 值和应力降 $\Delta\sigma$ 值随时间的变化曲线见图 5 和图 6. 曲线各点值为多台平均值, 各点上的竖线表示多台计算值的变化幅度或范围. 各曲线呈现了震区不同波段得到的震源参数值的变化过程, 曲线上方示出雅江 6.0 级地震的时间.

各波段计算的平均拐角频率 \bar{f}_c 值在 $1.2 \sim 3.5$ Hz 之间变化, 变化幅度大体一致. Pn , Pg 波段多台计算值的变化幅度相对较小, 而 Sg 波段各次地震的计算变幅相对较大. 计算的平均拐角频率值曲线在雅江 6.0 级地震前, 主要是 2 月 14 日 5.0 级地震前后起伏显著. 这在 Pn , Pg 波段计算的结果中尤其显著. Sg 波段计算的平均拐角频率值曲线未有此现象, 一直起伏变化较大.

图 6 示出各波段计算的地震应力降 $\Delta\sigma$ 值随时间的变化曲线. 图中曲线是按多台资料计算的各次地震值的平均值, 各点上的竖线表示变化范围. 取多台记录 Pn , Pg , Sg 波段的数字记录计算的地震应力降 $\Delta\sigma$ 值相比较, 差异不大, 在几个到几十个 0.01 Pa. 总体上看, 3 个波段的计算结果, 不论拐角频率 \bar{f}_c 值还是应力降 $\Delta\sigma$ 随时间的变化幅度在雅江 6.0 级地震前后的变化大体一致. 但是, 在雅江 6.0 级地震发生前, 主要是 2 月 14 日 5.0 级地震前后出现起伏, 应力降 $\Delta\sigma$ 值有所增大, 6.0 级地震前呈现为较高应力降状态. 这与震区地震活动的增加现象是一致的. 由于雅江 5.0 级地震前震区地震活动稀少、强度低, 还不能给出更长时间资料的统计分析结果.

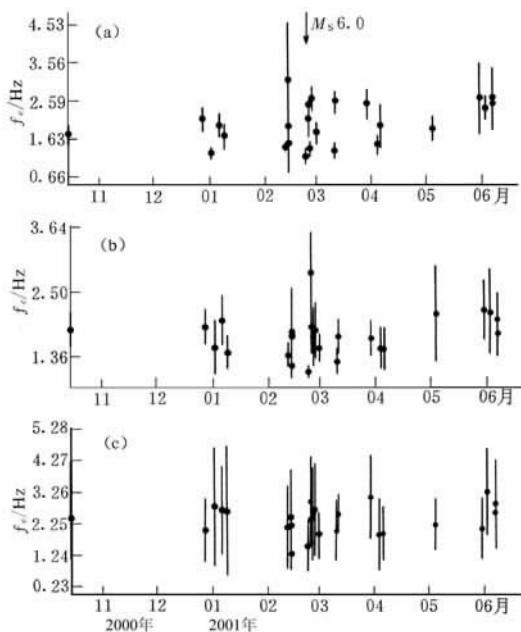


图 5 前、余震多台平均拐角频率 f_c 值随时间的变化曲线

(a) Pn 波; (b) Pg 波; (c) Sg 波

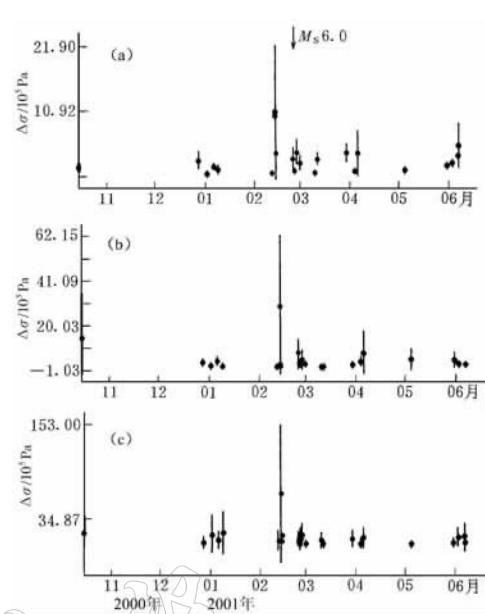


图 6 前、余震应力降 $\Delta\sigma$ 值随时间的变化曲线

(a) Pn 波; (b) Pg 波; (c) Sg 波

4 讨论和结论

雅江 6.0 级地震区处于北西向理塘—德巫断裂南东段东侧地区。1948 年曾发生理塘 7.3 级地震，其震源机制解结果主压应力方向为北西西，呈左旋走滑特征。其地震地表多条地裂缝带总体展布方向呈北 40° 西方向，长约 70 km、宽约 80 m，沿理塘—德巫断裂发育。1986 年理塘—日乃附近曾发生 5.6 级地震，在震中区的日乃出现走向北 $30^\circ \sim 50^\circ$ 东的地震裂缝，长约 1.8 km、宽 5 cm，呈左行雁列分布（王存翰，1987）。震源机制解呈现为斜滑错动类型，即垂向分量占有较大成分。2001 年雅江 5.0 级前震和 6.0 级主震的震源机制解结果，表明在区域应力场作用下呈挤压走滑错动形式，兼有一定斜滑分量。结合余震动态空间分布图象分析，由于雅江 5.0 级前震的断层走向推测是近 SN 方向，则呈右旋错动型式；雅江 6.0 级地震的断层走向推测是 NWW 方向，则呈左旋错动型式。两次地震的断层面走向是斜交的。因此，雅江地震前震和余震序列呈现的震源力学机制是复杂的。这与川滇菱形地块主边界断裂上顺走滑型强震的机制和余震分布图象有所不同。

将北西向鲜水河断裂带、南北向安宁河断裂带作为东部边界带，南部边界带取丽江—小金河断裂，西部边界带取金沙江主断裂带围限的区域称为雅江地块，属阚荣举（1977）提出的“川滇菱形块体”的北部地区。理塘—德巫断裂呈北西向斜切雅江地块的中部，若细分还可将该地块分为东、西两块。取雅江地块内 80 次历史地震震源机制解统计分析主压应力方位和 N 轴倾角分布比例。其归一化分布见图 7。主压应力轴优势方位分布显示，雅江地块压应力场优势方向在 $150^\circ \sim 170^\circ$ 方位，更多突出在 $160^\circ \sim 170^\circ$ 方位，即 SSE 方向。该地

块南部发生的一些地震, 震源机制解呈现为挤压斜滑错动类型。这与地块东边界断裂上顺走滑型强震的机制、错动类型, 以及余震分布图象有所不同。雅江地块东侧边界带的左旋滑动、西边界带的右旋滑动和南部边界带的挤压斜滑型式, 显示了该地块向南南东方向相对运动的力学作用型式。

震源断层错动或滑动方式由中强地震P波初动解结合N轴倾角的分布得到。根据雅江地块内80次地震的震源机制解中N轴倾角 α 分布, $\alpha < 30^\circ$ 的倾滑型地震比例均很低, 其走滑型地震比例高(图7b)。这次雅江地震的震源力学机制呈现为兼有一定逆冲分量的走滑错动类型。

应该指出, 雅江6.0级地震发生前震区应力降水平显示增强, 这与震区地震活动的增加是一致的。据雅江序列6.0级地震前后两个时段震区应力场的计算, 主压应力方向发生了偏转, 偏转约 74° 。因此, 雅江地震序列的衰减起伏过程, 前、余震波谱, 震源力学机制等均呈现复杂孕震图象。

感谢辛华高级工程师在计算机绘图方面的帮助。

参 考 文 献

陈天长, 崛内茂木, 郑斯华, 2001. 利用波初动和短周期振幅测定川滇地区地震震源机制解和应力场[J]. 地震学报, **23**(4): 436~440

程万正. 2002. 雅江6级地震预测问题的思考[J]. 地震, **22**(2): 47~52

黄彩权. 1983. 1948年理塘7.25级地震的发震断裂及地震破裂带特征[J]. 四川地震, **24**(2): 1~3

阚荣举. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, **20**(2): 96~107

王存翰. 1987. 1986年理塘5.6级地震考察[J]. 四川地震, **39**(1): 1~3

Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: Application to the San Fernando earthquake sequence[J]. *J Geophys Res*, **89**: 9 305~9 320

Julian B R, Foulger G R. 1996. Earthquake mechanisms from linear-programming inversion of seismic-wave amplitude ratios[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**: 972~980

Kisslinger C. 1980. Evaluation of S to P amplitude ratios for determining focal mechanisms from regional network observations[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **70**: 999~1 014

Nakamura A, Horiuchi S, Hasegawa A. 1999. Joint focal mechanism determination with source-region station corrections using short-period body-wave amplitude data[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **89**(2): 373~383

Sato T, Hirasawa T. 1973. Body wave spectra from propagating shear cracks[J]. *J Phys Earth*, **21**: 415~431

Schwartz S Y. 1995. Source parameters of aftershocks of the 1991 Costa Rica and 1992 Cape Mendocino, California earthquakes from inversion of local amplitude ratios and broadband waveforms[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**: 1 560~1 575

Silver P. 1983. Retrieval of source-extent parameters and the interpretation of corner frequency[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **73**: 1 499~1 511

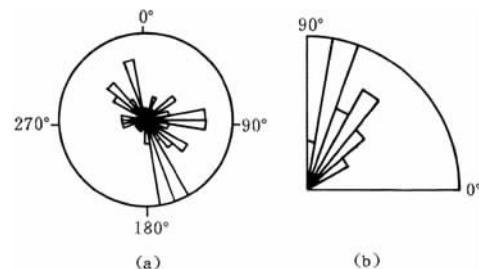


图7 雅江地块震源参数的统计分析

(a) 中强震机制解的主压应力轴方位分布;

(b) 中强震机制解的N轴倾角分布

CHANGES IN SOURCE PARAMETERS OF FORESHOCKS AND AFTERSHOCKS OF THE 2001 $M_S 6.0$ YAJIANG, SICHUAN, EARTHQUAKE

Cheng Wanzheng Chen Tianchang Wei Yaling Zhu Hang

(Seismological Bureau of Sichuan Province, Chengdu 610041, China)

Abstract: In this paper changes in focal mechanisms, parameters of wave spectra, and stress drops for the $M_S 5.0$ foreshock and $M_S 6.0$ mainshock in February 2001 in Yajiang County, Sichuan, and seismicity in epicentral region are studied. Comparison of focal mechanisms for the Yajiang earthquakes with distribution patterns of aftershocks the nodal plane 1, striking in the direction NNE, of the Yajiang $M_S 5.0$ event is chosen as the faulting plane; the nodal plane 2, striking in the direction WNW, of the $M_S 6.0$ event as the faulting plane. The strikes of the two faulting planes are nearly perpendicular to each other. The level of stress drops in the epicentral region before the occurrence of the $M_S 6.0$ earthquake increases, which is consistent with increase of seismicity in the epicentral region. The decay rate of the Yajiang earthquake sequence, changes in wave spectra for foreshocks and aftershocks, and focal mechanisms are complex.

Key words: Yajiang earthquake; sequence characteristics; source parameters