



新疆伽师强震群强震主破裂面走向初探

苏迺秦

(新疆维吾尔自治区地震局, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:1997年1月21日~1998年8月27日新疆伽师发生了包含9次6级地震的强震群,震源机制解表明有NE向和NW向两个节面.有观点认为主破裂面为NNW向.本文通过数字地震台阵的余震序列精确定位、震源破裂过程及滑动方向、震群空间分布图像、地震烈度等震线长轴走向和微、宏观震中动态变化方向等多种方法分析后,综合判定9次6级地震的主破裂面走向极可能为北东方向.

关键词:伽师;强震群;主破裂面;走向

中图分类号:P315.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0844(2003)03-0269-06

0 引言

众所周知,对地震主破裂面的判定是研究地震破裂过程、进而研究地震成因的重要内容之一.用震源机制解可求出包括地震主破裂面的两个节面,然而究竟哪个节面是地震主破裂面,还必须结合其它多种方法来判定.

1997年1月21日,新疆维吾尔自治区伽师县发生了6.0、6.2级地震;3月1日再次发生6.0级地震;4月6日发生6.4、6.2级地震;4月11日发生6.4级地震;4月16日又发生6.2级地震.进入1998年,8月2日发生6.1级地震;8月27日又发生了6.4级地震.至2000年3月27日(最后1次5级强余震),余震($M_L \geq 1.0$)达11 147次,其中包括10次5级强余震.1998年8月27日之前,震群分布在长轴(NNE向)约40 km,短轴(NWW向)约20 km的狭小地带内.1998年8月27日之后,长轴(NE向)长度稍有增长,变为约45 km;短轴(NW向)宽度向东扩展,变为约35 km.在历来强震稀少的塔里木盆地内,且在如此狭小的范围内,19个月里连续发生9次6级强震,在中国大陆板内地震中实属罕见.因而在国家科委、中国地震局和新疆维吾尔自治区人民政府的共同支持下,由丁国瑜院士牵头,开展了《新疆伽师强震群成因及帕米尔东北侧强震预测研究》的课题工作(以下简称“伽师课题”).研究中有观点认为伽师强震群的地震主破裂面方向为NNW向,如文献[1]中“根据较强地震的空间分布和震源机制解推断出伽师震群的发展构造为NNW向的雁行断裂”.但笔者对此有不同看法,本文即对其中9次6级强震的地震主破裂面的走向问题进行一些探讨分析.

1 震源机制解

1.1 6级地震基本参数

见表1.表中的震级参数来源于新疆地震局地震目录,其它参数来源于“伽师课题”中“相对定位目录”(使用新疆地震台网和邻国部分地震台站的资料)给出的6级以上地震参数^①.

收稿日期:2002-11-29

基金项目:“九五”国家科技攻关计划96-913-07项目成果

作者简介:苏迺秦(1946-),男(汉族),北京房山人,研究员,主要从事地震预报及其研究工作.

① 朱令人,周仕勇,单新建,等.伽师强震群成因综合研究.“九五”国家科技攻关计划(96-913-07-04)专题研究报告.2000.11.

表 1 伽师 6 级地震基本参数

序号	发震日期	发震时刻	震中位置		震级 M _S	震源深 度/km	地点
			北纬	东经			
1	1997-01-21	09:47'12.7"	39.51°	77.09°	6.0	17	伽师东北
2	1997-01-21	09:48'21.0"	39.59°	77.06°	6.2	18	伽师东北
3	1997-03-01	14:04'14.0"	39.72°	76.97°	6.0	20	伽师东北
4	1997-04-06	07:46'16.5"	39.56°	77.04°	6.4	29	伽师东北
5	1997-04-06	12:36'31.8"	39.51°	77.11°	6.2	21	伽师东北
6	1997-04-11	13:34'43.3"	39.65°	77.06°	6.4	21	伽师东北
7	1997-04-16	02:19'09.4"	39.69°	77.02°	6.2	18	伽师东北
8	1998-08-02	12:40'41.0"	39.77°	77.07°	6.1	16	伽师东北
9	1998-08-27	17:03'33.0"	39.74°	77.24°	6.4	15	伽师东北

1.2 震源机制解

伽师强震群是国内外瞩目的震群活动,其 6 级地震的震源机制解有多方面的结果,其中包括:新疆地震局高国英研究员根据新疆和全国地震台网 P 波初动求解的结果;中国地震局地质研究所单新建博士等利用国内外全球数字地震台网(GDSN)建立点源位错模型求解的结果;中国数字化地震台网(CDSN)提供的结果;美国哈佛大学提供的结果. 4 个方面的结果列于表 2^①.

表 2 伽师强震群 6 级地震震源机制解

编号	时间 年月日时分	节面 I			节面 II			P 轴		T 轴		B 轴		X 轴		Y 轴	
		走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	仰角								
	1997-01-21 09:47'	84	NNW	65	358	E	80	40	24	307	12	224	61	351	10	88	25
1	*	262		76	4		50	205	15	290	10						
	#	219		38	329		75	202	48	85	22	340	34				
2	\$ 1997-01-21 09:48'	233		83	324		83	9	10	279	10	191	80				
3	1997-03-01 14:04'	64	NNW	30	32	SE	65	83	68	315	20	218	18	336	25	122	60
	#	256		78	348		81	212	15	122	2	23	75				
4	1997-04-06 07:46'	53	SE	70	131	NE	45	0	18	111	47	260	39	152	45	40	20
	*	70		80	164		68	30	18	110	13						
	#	256		79	165		85	210	5	120	10	330	75				
	\$	248		83	158		89	293	4	23	5	162	82				
5	1997-04-06 12:36'	62	SE	60	121	NE	60	3	0	46	45	277	45	160	30	40	30
	*	243		37	16		63	250	70	115	16						
	\$	243		42	16		59	53	63	306	9	202	25				
6	1997-04-11 13:34'	66	NNW	50	358	E	65	39	47	298	10	102	41	334	25	88	40
	*	215		38	26		52	280	82	109	6						
	#	267		78	176		86	225	5	130	1	340	80				
	\$	231		41	2		56	229	68	109	8	26	20				
7	1997-04-16 02:19'	74	NNW	60	3	E	60	45	44	312	5	220	46	344	30	94	30
	*	70		57	180		62	41	30	294	4						
	#	53		74	177		53	29	40	130	12	233	48				
	\$	67		62	175		60	31	43	122	1	213	46				
8	1998-08-02 12:40'	47	NW	55	179	E	45	12	63	115	5	105	23	315	45	90	35
	*	47		64	177		37	359	54	126	16						
	\$	47		64	177		37	359	61	117	15	214	24				
9	1998-08-27 17:03'	54	NW	70	139	SW	75	1	5	275	25	117	63	323	15	228	20
	#	267		28	18		79	260	50	120	29	24	25				
	\$	240		84	331		86	196	7	105	1	7	83				

注: * 为单新建等求解的结果; # 为 CDSN 求解的结果; \$ 为美国哈佛大学求解的结果;未标注者为新疆地震局高国英、聂晓红求解的结果.

由表可知,尽管不同作者得到的节面、应力轴有一定差别,但断层的性质是基本一致的,都是正走滑—倾滑地震,主压应力为 NNE 向或 NS 向.

另外,在收集了乌鲁木齐地震遥测台网、新疆区域地震台网、全国地震台网资料的基础上,又补充了周边各国(哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、印度)、其中包括吉尔吉斯与美国合作地震台网的资料.以多台记录清晰,台网包围较好,所得结果可靠性较高为原则,挑选了从 1997 年 1 月 23 日至 1997 年 11 月 4 日的 39 个地震($M_s: 4.5 \sim 5.9$),采用初动符号法求解其震源机制解^①.规定 P 轴仰角大于 45° 为正断层, T 轴仰角大于 45° 为逆断层; P 轴和 T 轴仰角均小于或等于 45° 为走滑断层.统计结果表明,伽师震群 4~5 级地震走滑型占 74.4%,倾滑型占 25.6%;正断层占 78.3%;逆断层占 21.7%. NNE 向压应力起主要作用,近 EW 向的张应力也不可忽视.这些结果与 6 级地震的结果是一致的.应力轴玫瑰图见图 1.

由伽师震源区地震的震源机制解推断,该区域构造应力场主压应力为 NNE 向;张应力为近 EW 向;震源机制以走滑—正倾滑为主;地震断层以正断层型为主.9 次 6 级地震两个节面的走向分别为 NE 向和 NW 向,其中之一应为地震主破裂面.

2 构造

伽师强震群区位于塔里木盆地西北尖角区内喀什拗陷东北边缘,地表有 12 000~13 000 m 厚的沉积层.野外地质调查资料显示震区未见地表断裂及活动迹象.在 70 年代出版的《新疆石油图集》上标有根据重磁测量所推测的 1 条 NW 向麦盖提基底断裂,其西北端可能位于伽师强震群区内.但据石油勘探结果,麦盖提基底断裂至少在 12 000 m 以上无显示.而在伽师西南有一条 NW 向的羊达曼隐伏断裂,深度达 15 000 m 以下;还有两条几乎与其正交的 NE 向隐伏断裂,均未延伸到震源区^[2].

刘启元等根据 1998 年 5~11 月在伽师强震群区及其邻域布设的 30 台 EDAS-3M 型数字地震仪组成的地震台阵的观测结果,反演得到伽师强震群区壳幔界面的等深线图(图 2)^②,表明伽师强震群正好分布在壳幔界面深度变化剧烈的梯度带上方,梯度带在此呈“V”字形,左翼为 NW 走向,右翼为 NE 走向.该方法检测到了震群区北部邻域的柯坪断裂带,但未检测到震群区地壳内是否存在断裂带.

张先康等按“伽师课题”的要求,在伽师周围布设了两条人工地震测深剖面和一个三维人工地震透射台阵,探测研究结果表明^③:伽师强震群区处在一个地壳厚度由南向北都急剧变化的地区,形成了一个明

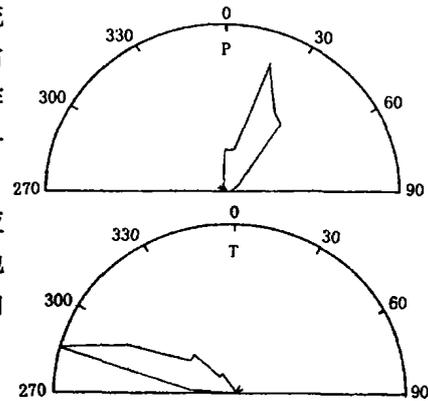


图 1 伽师中强震主压、主张应力玫瑰图

Fig. 1 Rose map of principal compressive and tensile stress of Jiashi medium-strong earthquakes.

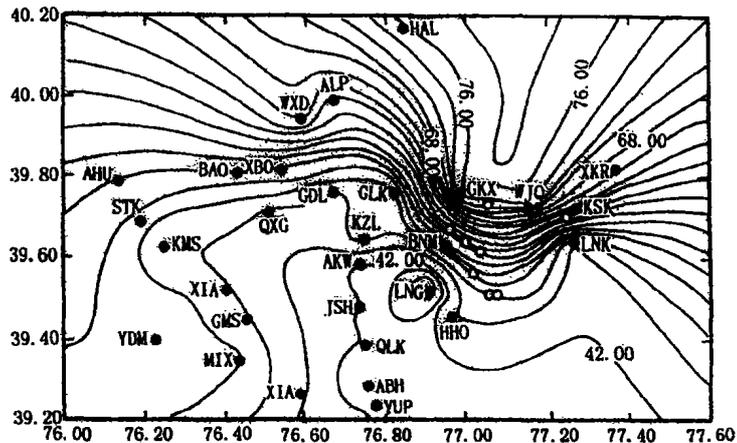


图 2 伽师强震群区壳幔界面的等深线图 (据刘启元等, 2000)

Fig. 2 Isobath of crust-mantle boundary in Jiashi strong swarm region (From LIU Qiyuan et al., 2000).

② 刘启元,陈九辉,李顺成,等.新疆伽师强震群区三维地壳上地幔速度结构及其地震成因的探讨.“九五”国家科技攻关计划(96-913-07-02-02)专题研究报告.2000.09.
③ 张先康,赵金仁,张成科,等.深地震宽角反射/折射剖面深部结构的探测和研究.“九五”国家科技攻关计划(96-913-07-02-01)专题研究报告.2000.11.

显的、局部性的上地幔隆起,但未能指明与地震破裂方向有关的构造.该方法检测到了震群区邻域的西昆仑北缘断裂和柯坪断裂,未能断定震群区地壳内是否存在断裂.

从上述伽师强震群区的深浅部发震构造背景来看,震群区地壳内尚无得到确认的断裂带,而推测的隐伏断裂和壳幔界面深度变化梯度带的走向既有 NW 又有 NE,则伽师强震的主破裂面有可能是 NW 向或 NE 向.

3 伽师强震群地震主破裂面方向的判定

伽师强震群中 9 次 6 级地震的主破裂面,判断为北东走向的节面(表 2 中的节面 I).主要依据如下:

3.1 精确定位的余震序列空间分布走向

刘启元等在专题研究报告②中,根据地震台阵记录的资料,采用改进的震中联合定位(JHD)方法,对 1998 年 8 月 2 日 6.1 级和 8 月 27 日 6.4 级强震的地震序列进行了精确定位.其走时残差为 0.01~0.24 秒,平均为 0.1 秒;震中定位误差为 0.4~3.2 km,平均误差为 0.8 km;深度误差为 0.6~2.0 km,平均误差为 1.3 km.图 3 为用 JHD 方法得到的这两次强震地震序列的震中分布图.

图中清晰地显现出 AA'、BB' 这两次 6 级强震的余震序列空间走向,即地震主破裂面的空间走向为 NE 向,方位角分别为 57°和 62°.并且与表 2 中 1998 年伽师 2 次 6 级地震的节面 I 的走向相当一致.这是基于观测事实的雄辩证据.从图中还可推断出这两次 6 级地震的断层破裂长度分别为 40 km 和 65 km.

3.2 强震震源破裂过程

据专题报告①,伽师震群强震震源破裂的持续时间短,破裂基本上是由一点向四周的快速扩散,无明显方向,反映震源区介质在震群发生前无明显的预存断裂,强震群可能是完整岩层区的新破裂.这与上述深浅部构造研究未能确认存在地壳断裂带的结果是不谋而合的.但该专题对伽师强震震源破裂过程滑动方向的研究同时发现:1997 年 1 月 21 日 09 时 47 分 6.0 级、4 月 6 日 07 时 46 分 6.4 级和 4 月 16 日 6.2 级地震具有明显的左旋走滑特征.伽师强震的主压应力方向为近 SN 向,只有 NE 走向的那个节面才可能产生左旋走滑破裂,从而证明这三次 6 级地震的 NE 走向的节面 I 是地震主破裂面.

研究发现其他几次 6 级地震中,1997 年 4 月 6 日 12 时 6.2 级、4 月 11 日 6.4 级和 1998 年 8 月 2 日 6.1 级地震的滑动方向具有很大的垂直分量,发震断层为正断层,水平滑动方向不易分辨;而 1997 年 1 月 21 日 09 时 48 分 6.2 级、3 月 1 日 6.0 级和 1998 年 8 月 27 日 6.4 级地震的波形均受到前震的干扰而难以判别滑动方向.考虑到 9 次 6 级地震在同一小区内,主压应力方向应一致,同属一个强震群,震源机制解又相近,其地震主破裂面的走向较大可能是一致的,即 NE 方向.

3.3 震群序列空间分布图像的研究

使用相对定位目录($M_L \geq 3.0$, 1997 年 1 月 21 日~1999 年 3 月 25 日)分时段作震中分布图,发现伽师强震群的空间分布图像有一个从 NNE 向分布变化为 NE 向分布的过程.图 4(a)、(b)分别为 1997 年 1 月 21 日~3 月 31 日、1997 年 4 月 1 日~1998 年 8 月 26 日的震中分布图,长轴均呈现 NNE 走向;图 4(c)为 1998 年 8 月 27 日~1999 年 3 月 25 日的震中分布图,已明显变为 NE 走向.这主要是由于 1998 年 8 月 27 日的 6.4 级地震向北东方向迁移所致.图 4(d)为 1997 年 1 月 21 日~1999 年 3 月 25 日的震中分布图,

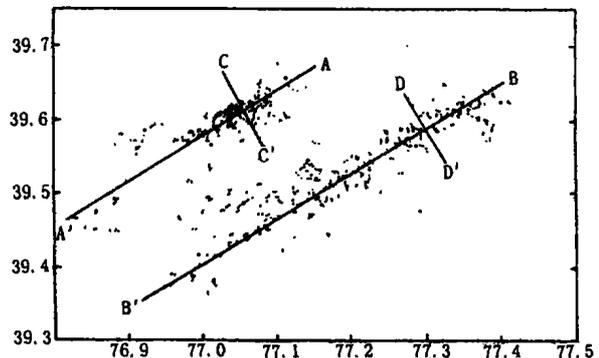


图 3 1998 年 8 月 2 日 6.1 级(AA'剖面)和 8 月 27 日 6.4 级(BB'剖面)地震序列的精确定位(据刘启元等,2000)

Fig. 3 Epicenter location of earthquake sequence for M6.1 earthquake on Aug. 2, 1998 (profile AA') and M6.4 earthquake on Aug. 27, 1998 (profile BB') (From LIU Qiyuan et al. 2000).

总体呈 NE 走向。一般地震序列空间分布的长轴走向与主震的地震主破裂面走向一致。

3.4 强震烈度等震线几何特征

对伽师强震群中发生的 9 次 6 级地震,新疆地震局开展了 5 次地震现场工作。通过大量的实地考察,绘制了地震烈度等震线图。

1997 年 1 月 21 日 6.0、6.2 级地震的烈度等震线和 1997 年 3 月 1 日 6.0 级地震的烈度等震线均为椭圆形,长轴走向为 NE 方向。1 月 21 日 6 级地震的宏观震中为北纬 $39^{\circ}35'$,东经 $77^{\circ}02'$;3 月 1 日 6 级地震的宏观震中为北纬 $39^{\circ}29'$,东经 $76^{\circ}53'$ (详见文献[3])。

1997 年 4 月 6 日 6.4、6.2 级、4 月 11 日 6.4 级、4 月 16 日 6.2 级 4 次 6 级地震的烈度等震线基本呈椭圆形,长轴走向为 NE 方向。宏观震中北纬 $39^{\circ}33'$,东经 $76^{\circ}55'$ (详见文献[4])。

1998 年 8 月 2 日伽师 6.2 级地震烈度等震线较为奇特,最大烈度为 VII 度。VI 度区为不太规则的椭圆形,长轴为 NWW 走向;而 VII 度区有 3 个,均为椭圆形,其中一个的长轴为 NW 走向,另两个的长轴为 NE 走向,且最长的极震区的长轴走向为 NE 方向。微观震中(北纬 39.77° ,东经 77.07° ,见表 1)恰又落在这个极震区内。可以认为这个地震极震区长轴的优势走向仍为 NE 方向。宏观震中为北纬 $39^{\circ}36'$,东经 $76^{\circ}58'$ (详见考察报告④)。

1998 年 8 月 27 日伽师 6.4 级地震烈度等震线为椭圆形,长轴走向为 NE 方向。宏观震中为北纬 $39^{\circ}49'$,东经 $77^{\circ}21'$ (详见文献[5])。

上述情况表明,伽师强震群中 9 次 6 级地震的地震烈度等震线长轴走向均为 NE 方向。一般说来,地震烈度等震线的长轴走向与主震的地震主破裂面走向是基本一致的。

另外,分析上述 5 个地震烈度等震线的宏观震中(一般为几何中心),总体上经纬度随时间推移而逐渐加大(只有首发的 2 次 6 级地震的宏观震中经纬度稍有不符,但它也在最后 1 次 6 级地震的东南面),即呈现逐渐向 NE 方向迁移的动态变化过程。表 1 中的微观震中经纬度也大致显示出类似变化。在同一地震序列中,后续地震多数沿已发地震(尤其是主震、强震)主破裂面走向的延伸方向发生,这一事实也可能构成一个证据。

4 结语和讨论

(1) 对于新疆伽师地区,现有的震源机制解和深浅部构造资料尚无法判明 9 次 6 级强震的地震主破裂面走向,只能指出既有可能是 NW 方向,又有可能是 NE 方向。

(2) 采用余震序列精确定位、震源破裂过程及滑动方向的研究、震群空间分布图像分析、地震烈度等震线长轴走向的分析和微、宏观震中动态变化方向的分析等多种方法,可综合判定伽师强震群中 9 次 6 级地震的主破裂面走向极有可能为 NE 方向。

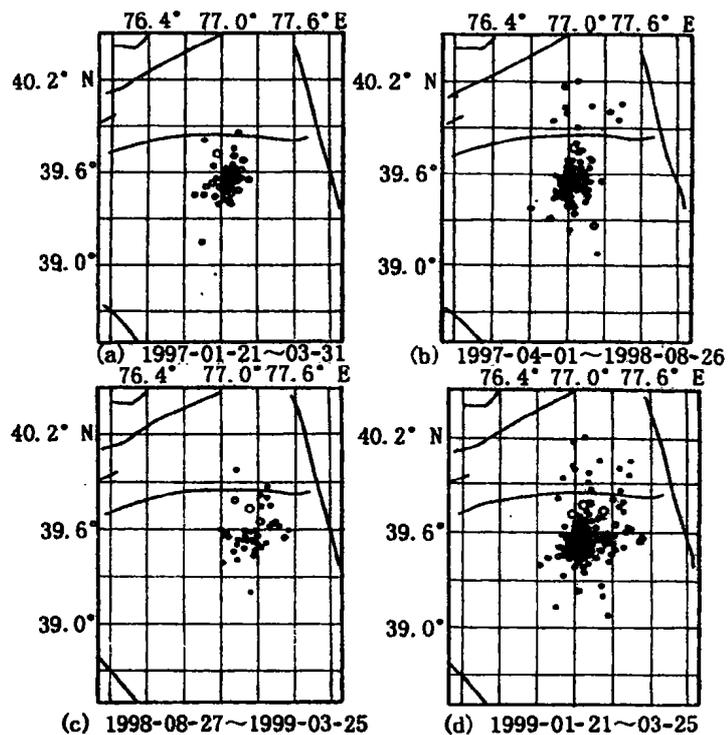


图 4 伽师强震群空间分布图 ($M_L \geq 3.0$)

Fig. 4 Spatial distribution for Jiashi strong swarm ($M_L \geq 3.0$).

④ 新疆维吾尔自治区地震局现场考察队. 1998 年 8 月 2 日新疆伽师 6.0 级地震宏观烈度考察报告. 1998. 11.

(3) 无论是数字地震台阵观测还是人工地震剖面深部探测,在当前的条件下通过对地下波速的深部反演,可以发现一些地壳中的深大断裂带(如西昆仑北缘断裂和柯坪断裂),但难以发现规模较小的地下断裂(例如伽师强震群造成的地下断裂)。因而难以用于对小尺度的震源过程的研究。

(4) 在通过地震波形反演地震破裂过程中(断层面破裂方向、滑动尺度或破裂面积、滑动或错动方向、破裂持续时间和上升时间等),数字地震台阵观测的震源精确定位对于小尺度震源过程和震源区性状的研究是十分有意义的。因此在实际工作中应针对不同的研究目标,分别采用人工地震剖面深部探测方法和数字地震台阵观测方法。在当前全国数字地震台网密度逐渐加大的情况下,为了加强对震源过程和地震成因的研究,较多地开展数字地震台阵观测,并加强对数字地震波形的分析反演,也许更为有效和经济。

(5) 虽然震群空间分布图和地震烈度等震线图的长轴走向与震源机制解节面 I (主要是新疆地震局的结果)的走向均属 NE 方向,但角度却有差别。总体状况是:1997 年 7 次 6 级地震(震中分布图包含了 1998 年 8 月 2 日的 6.1 级地震)的震群分布图和等震线图的长轴走向均为第一象限中小于 45° 的角,即 NNE 或 NE 方向;而震源机制解节面 I 的走向(见表 2)多大于 60° (其中 5 个大于 62° ,2 个 53°),为 NEE 方向。1998 年 2 次 6 级地震(震中分布图只包含 1998 年 8 月 27 日的 6.4 级地震)的震群分布图和等震线图的长轴走向均为第一象限中大于 45° (甚至大于 60°)的角,即为 NEE 方向;而震源机制解节面 I 的走向却均小于 45° ,为 NE 方向。前者按顺时针方向偏转变化,后者按逆时针方向偏转变化。这种差别的原因肯定与测定方法有较大误差有关,也与地面响应(尤其是烈度值的测定)的多因素客观差别有关。它提示我们应当随着地震科学的进步不断提高各种测定方法的精度。

(6) 伽师地区的主压应力方向为近 SN 向,则容易发生剪切破裂的方向为 NW 方向或 NE 方向。深浅部构造资料也表明该区强震的主破裂面既有可能是 NW 方向,又有可能是 NE 方向,但为什么 9 次 6 级强震的主破裂面走向为 NE 方向? 这是一个与地震成因密切相关的问题,也是我们尚未探明并须不断努力探索的科学问题。

[参考文献]

- [1] 周仕勇,许忠淮,陈晓非.伽师强震群震源特征及震源机制力学成因分析[J].地球物理学报,2001,44(5):654—662
- [2] 朱令人,苏迺泰,杨马陵.1997年新疆伽师强震群及三次成功的临震预报[J].中国地震,1998,14(2):101—115.
- [3] 赵瑞斌,胡伟华,王坚.1997年伽师地震震害与损失评估[J].内陆地震,1997,11(4):405—410.
- [4] 罗福忠,张云峰,吕桂林,等.1997年4月6日、11日、16日新疆伽师4次6.3~6.6级地震烈度分布及震害特征[J].内陆地震,1997,11(4):399—404.
- [5] 李猛,伊力亚尔,张云峰,等.1998年8月27日伽师6.6级地震宏观烈度与震害[J].内陆地震,2000,14(1):46—50.

PRELIMINARY STUDY ON STRIKE OF MAIN RUPTURE SURFACE OF JIASHI STRONG EARTHQUAKE SWARM

SU Nai-qin

(Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China)

Abstract: From Jan. 21, 1997 to Aug. 27, 1998, the strong earthquake swarm including 9 events of M_s 6 occurred in Jiashi, Xinjiang Uygur Autonomous Region. The focal mechanism solutions show that 9 events have both two nodes of NE and NW. In some people's opinions, the main rupture strike of the swarm is NNW direction. In this paper, through analysis on the precise location of aftershock sequences recorded by digital seismic array, focal rupture process and slipping directions, spatial distribution image of earthquake swarm, long-axis strikes of intensity isoseismal line, and dynamic change trends of micro-macro epicenters, the conclusion that main rupture strike is most likely NE direction is Obtained.

Key words: Jiashi; Strong earthquake swarm; Main rupture surface; Strike