

1975年2月4日辽宁省海城 地震的震源机制

顾浩鼎

陈运泰

(辽宁省地震局) (中国科学院地球物理研究所)

高祥林

赵毅

(宁夏回族自治区地震队) (国家地震局广州地震大队)

摘 要

由地震纵波初动符号的资料,求得了海城地震系列中 $M_s \geq 4.0$ 的24个地震的断层面解。主震发生于1975年2月4日,它的一个节面走向 $N70^\circ W$, 倾向 NE, 倾角 81° ; 另一个节面走向 $N23^\circ E$, 倾向 SE, 倾角 75° 。根据余震的空间分布以及地面形变资料选取 $N70^\circ W$ 的节面为断层面,主震是发生在这个近乎直立的断层面的左旋走向滑动,略具正的倾向滑动分量。前震及大多数余震的震源机制和主震的相似,有四个 $M_s \geq 4.0$ 的余震的震源机制和主震的迥然不同,表现出滑动向量和主震的滑动向量相反的断层错动方式。这种情况的一种可能的解释是主震时在断层的一些地段发生错动过头。

由野外资料及余震的空间分布资料计算了主震的震源参数。主震断层长70公里,宽20公里,平均错距45厘米,地震矩 2.1×10^{26} 达因·厘米,应力降4.8巴,应变降 7.3×10^{-4} 。它是发生在不能积累起较高应力的薄弱地带的一次低应力降的地震。

由地震纵波初动的半周期和振幅的资料计算了81个前震和余震的震源尺度、地震矩、应力降和平均错距。结果表明前震和余震的应力降都比较低,一般在0.1—1巴之间。余震区中有两个应力降相对来说比较高(高于0.8巴)的地区,它们恰好对应于主破裂错动过头的部位。这些结果意味着震前高应力、错动过头、相对高应力降和震源机制反向四者之间有内在联系,说明错动过头、相对高应力降和震源机制反向是震前高应力的表现和结果。

一、引 言

震源机制的研究,可以给出大地震孕育和发生过程的重要信息,有助于阐明地震前兆的时-空分布特点。因而在国内外有许多地震工作者做出种种努力,以确定地震的震源机制和测定越来越多的震源参数。

本文旨在探讨1975年2月4日海城7.3级地震的震源过程。为此,研究了整个地震系列中的较大地震的震源机制,估算了主震的震源参数,并测定了前震和余震的震源参数。

本文的一个结果是注意到了有些强余震的震源机制和主震的震源机制相反的现象,提出了错动过头的假设对这种现象给予力学上的解释。另一个结果是,注意到了震前高应力、错动过头、震源机制反向和相对高应力降四者之间可能的内在联系。错动过头,机

制反向和相对高应力降是震前高应力的表现和结果。

二、主震的断层面解

为了了解海城地震的震源过程,由地震纵波初动符号的资料,求得了海城地震系列中 $M_s \geq 4.0$ 的 24 个地震的断层面解(见表 1)。其中,包括了主震、2 个前震和 21 个余震。图 1 是根据全国地震台网的记录和国外地震台网的资料得到的主震的断层面解。图中,把震源球上半球投影在乌尔夫网上;黑点表示初动向上,圆圈表示初动向下;大的符号表示国内台网的数据点,小的符号表示国外台网的数据点。共有 162 个数据点,其中国内台网的 73 个,国外台网的 89 个。矛盾的数据点共有 23 个,其中国内台网的 5 个,国外台网的 18 个。考虑到国内台网记录的这次大地震的初动资料比较丰富和可靠,所以主要根据国内台网的初动资料确定主震的断层面解。由外国地震台网的临时报告中得到的初动资料作为参考。由图 1 可见,由纵波初动资料得出的两个可能的断层面可以确定得很好,可变动范围很小。

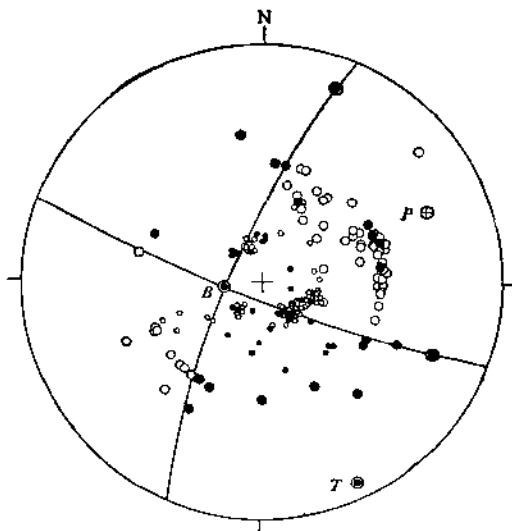


图 1 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城 7.3 级地震的断层面解

表 1 的第三行是主震(编号 3)的断层面解。为了从两个可能的断层面中,确定出真正的地震断层,可以借助其它资料,如余震的空间分布、地震引起的地面形变资料。

图 2 是余震的空间分布。由图 2a 可以看出,余震震中分布在 $N67^\circ W$ 的长条形地带,大体上呈椭圆形,其长轴沿北西向,长约 70 公里,走向同 $N70^\circ W$ 的节面(节面 I)几乎一致。图 2b 是主震和余震在图 2a 所示的 AA' 剖面上的投影,它清楚地表明主震和余震在节面 I 上的分布情况,即:主震在余震区的下部,其震中靠近余震区的东南端,距此端点约 26 公里,在西北端,震源较深,而在东南端,震源较浅,由东南端至西北端,震源沿着与地面成 15° 的轴向分布。图 2c 是主震和余震在图 2a 所示的 BB' 剖面上的投影,它也清楚地表明,主震位于余震区的下部,还表明,余震大都分布在近乎直立的平面附近。所有这些情况都表明由初动资料得出的节面 I 是真正地震断层面。

地面形变的测量资料也支持北西向的节面是真正的断层面这一判断。图 3 是震后对地震区的三角点复测的结果,它表示了海城地震引起的地面水平形变(1975 年相对于 1958 年的变化)。图中的他山、大青山、海龙山三角形边长的变化,说明了主震是沿着北西西向断层的左旋剪切错动。对于一个北西西向的左旋平移断层,靠近震中最近的大青山应当有最大的北西西向的水平位移,而离震中较远的他山的北西西向水平位移则应较小,因而他山—大青山的边长应当有明显的缩短。否则,根据断层面解,这次大震就应当是沿

表 1 海城地震及其 $M_s \geq 4.0$ 的前震和余震的目录及断层面解

编 号	日 期 年.月.日	发震时刻 时-分-秒	震中位置 北 纬 东 经		震 度 (公里)	节 面 I		节 面 II		P 轴	T 轴		B 轴		X 轴		Y 轴		精 度
						走 向	倾 向	走 向	倾 向	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	倾角	方位	
1	1975.2.4	07-50-47	40°40'	122°45'	17	N70°W	SW	N17°E	SE	61°	15°157'	22°	300°	64°107'	26°200'	26°200'	5°	5°	A
2	2.4	10-35-55	40	47	15	N71°W	SW	N17°E	SE	61	13 155	18 297	68 108	22 199	4	4	4	4	A
3	2.4	19-36-06	39	48	12	N70°W	NE	N23°E	SE	66	17.5 157	4	100	72.5 112	15	20	9	9	A
4	2.4	20-37	41	52	4.0														
5	2.4	20-39-08	40	48	4.1														
6	2.4	21-17-26	46	20	4.1														
7	2.4	21-32-35	44	43	5.5														
8	2.4	21-40-09	40	48	4.1														
9	2.4	21-56-46	43	47	4.3														
10	2.4	22-03-13	39	47	4.3														
11	2.4	23-32-05	48	24	4.2														
12	2.4	23-49-16	43	40	4.0														
13	2.5	01-01-45	43	56	10	N62°W	NE	N28°E	NW	86	2 343	4	143	86 297	4	28	2	2	B
14	2.5	02-56-29	40	49	10	N68°W	SW	N22°E	SE	84	3 157	6	310	83 112	6	202	2	2	B
15	2.5	03-07-13	43	45	10	4.4													
16	2.5	12-33-00	41	46	10	N54°W	SW	N41°E	NW	80	28 171	13	59	59 311	10	216	29	29	B
17	2.5	23-52-54	42	38	10	N55°W	SW	N37°E	NW	85	22 168	14	47	64 308	5	215	26	26	B
18	2.6	05-43-42	37	54	23	N68°W	NE	N22°E	SE	88	3 338	0	231	86 112	2	22	3	3	A
19	2.6	12-24-57	48	30	17	N18°W	SW	N79°E	NW	56	31 35	16 149	54 349	34 252	10	4	4	4	A
20	2.6	23-56-16	45	50	10	N64°W	SW	N14°E	SE	40	169	41 56	25 304	38 104	50	206	10	10	B
21	2.8	02-30-23	40°49'	122°28'	12	N19°W	SW	N82°E	NW	50	293	38 37	18 148	48 351	40	251	12	12	B
22	2.12	20-42-46	42	47	7	N37°W	SW	N 3°E	SE	46	171	68 73	3 341	22 94	44 233	38	38	38	B
23	2.15	21-08-02	42	47	12	N69°W	SW	N18°E	SE	64	62	14 158	22 303	63 108	26 201	6	6	6	A
24	2.16	22-01-26	41	48	11	N57°W	SW	N39°E	SE	84	260	15 163	24 20	62 121	6 213	28	28	28	A
25	2.18	18-51-49	46	39	17	N66°W	SW	N14°E	SE	80	252	23 142	39 5	42 104	10	204	46	46	B
26	2.22	15-45-14	42	44	12	N67°W	SW	N19°E	SE	54	60	21 162	29 300	54 109	36 203	5	5	5	B
27	2.24	05-07-20	47	53	7	N48°W	SW	N78°E	NW	48	278	60 17	5 110	30 348	42 222	33	33	33	B
28	2.25	04-52-10	44	37	14	N46°W	SW	N46°E	NW	86	276	14 180	8 62	74 316	4 225	16	16	16	A
29	2.26	05-09-53	40	49	8	N59°W	SW	N30°E	NW	70	254	14 347	14 121	70 301	20 30	0	0	0	A
30	3.21	11-32-59	46	57	11	N80°E	NW	0°	E	62	38	34 132	7 231	56 90	28 350	18	18	18	B
31	3.29	23-16-36	46	36	6	N69°W	SW	N19°E	SE	66	63	13 158	20 303	65 109	24 201	5	5	5	A
32	4.10	03-55-37	43	29	10	N62°W	SW	N27°E	SE	81	253	3 163	10 357	80 118	5 208	9	9	9	B
33	4.21	00-17-06	46	27	8	N71°W	SW	N16°E	SE	60	59	17 157	25 299	59 106	30 199	6	6	6	B
34	7.4	07-06-29	43	43	10	N43°W	SW	N59°E	NW	74	283	36 185	12 80	52 329	16 227	34	34	34	B
35*	1974.12.22	12-46-18	41°25'	123°06'	6	N23°W	SW	N50°E	SE	76	179	45 291	22 39	37 140	14 247	50	50	50	A

* 辽阳陡岗水库地震

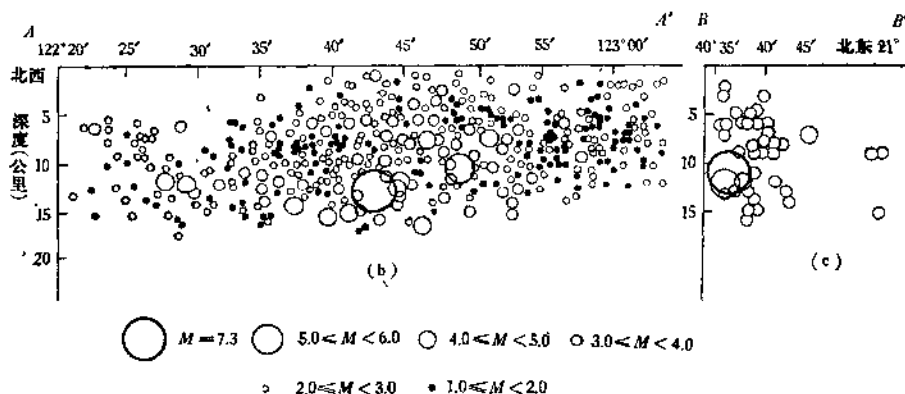
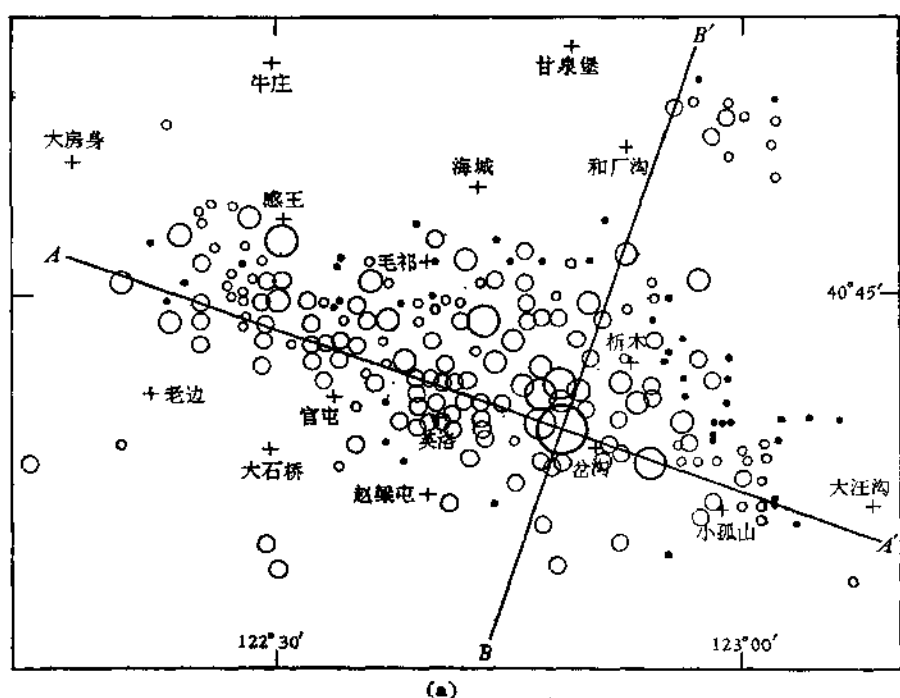


图 2 余震的空间分布

北北东向断层的右旋剪切错动。在这种情况下,大青山应当有最大的平行于北北东向节面的水平位移,而他山的位移则应较小;由于他山一大青山的测边几乎和北北东向节面垂直,因而他山一大青山的边长应当不会有明显的伸缩。测量结果表明,他山一大青山边长的变化最大,缩短了 38 厘米。这一事实说明,北西西向的节面 I 是主震的断层面。

余震的空间分布和地面形变的测量资料,一致地表明这次海城 7.3 级地震是发生在一个近乎直立的断面上的剪切错动,其走向是 $N70^{\circ}W$, 倾向 NE, 倾角 81° , 走向滑动呈左旋性质,倾向滑动呈正断层性质,滑动向量与地面的夹角约 15° 。

海城地震释放的应力的主压应力轴方向是 $N66^{\circ}E$, 这同东北和华北地区的一些较大的浅源地震所释放的应力的主压应力轴方向是一致的。表 2 列举了上述地区 6 个较大的

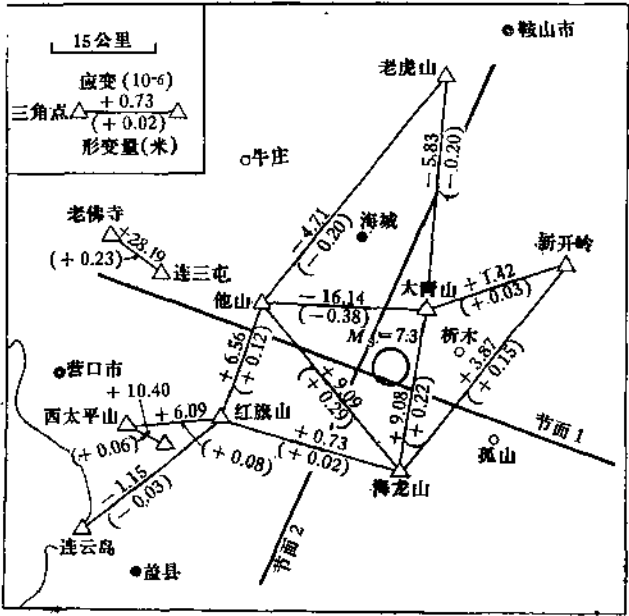


图 3 海城地震引起的地面水平形变
(1975 年相对于 1958 年的变化)

浅源地震的断层面解。由表 2 可见,发生这些较大的浅源地震时,释放的应力的主压应力轴的取向都是北东东—南西西向。这一事实显示了在中国东北和华北地区,在这些地震所在范围内应力场的分布情况是很一致的。鉴于这种情况,东北和华北地区的北北东向和北西西向的构造带或其交汇地区的地震危险性是应当首先给予注意的。

表 2 东北和华北地区一些较大的浅源地震的断层面解*

编号	日期	地点	震中位置		深度 (公里)	震级 (M_s)	节面 I			节面 II			主压应力轴		主张应力轴	
			北纬	东经			走向	倾向	倾角	走向	倾向	倾角	方位	倾角	方位	倾角
1	1960. 4. 13	吉林 土桥	44°39'	126°54'	8	5.7	55.3	NW	82	139	SW	49	285.5	34	180	21.5
2	1966. 3. 8	河北 隆尧	37°21'	114°55'	10	6.8	21	SE	75	114	SW	80	67	4	158	18
3	1966. 3. 20	河北 巨鹿	37°16'	114°58'	14	5.6	29	NW	65	311	NE	66	260	1	350	36
4	1966. 10. 2	吉林 怀德	43°47'	125°04'	24	5.2	42	NW	64	142.5	NE	69	271.5	3	3.5	34.5
5	1967. 3. 27	河北 河间	38°33'	113°36'	30	6.3	15	NW	61	287	NE	85	238	17	335	24
6	1969. 7. 18	山东 渤海	38°24'	119°36'	35	7.4	20	SE	80	292	SW	75	246	4	155	18

* 据国家地震局资料。

三、前震和余震的断层面解

表 1 给出了截至 7 月 4 日为止海城地震及其 $M_s \geq 4.0$ 的前震和余震的目录及断层面解。在这个表中,包括了主震、2 个前震和 21 个余震的断层面解。有 10 个 4.0 级以上地震,因受主震的尾波或在它之前不久发生的地震的尾波的强烈干扰,未能求得其断层面解,

所以在表中仅列出其目录,作为比较,表 1 中也给出了 1974 年 12 月 22 日辽阳蓼窝水库 4.8 级地震(编号 35)的断层面解。这些结果主要是根据辽宁省地震台网的初动符号资料求得的。在许多台站的记录图中,都可认出 P^* 、 P_s 和 $\bar{P}$ 等三个震相或其中的两个。因此,在确定前震和余震的断层面解时,既用了这些地震的界面首波初动资料,也用了直达波初动资料,使有用的资料点的数目大大增加。此外,由于许多台站的位置恰好有利于用来确定上述地震的节面(见图 4),因而大多数断层面解比较可靠。在这些结果中,节面可变动范围较小($\leq 10^\circ$)、资料较丰富者属 A 类,节面可变动范围较大($> 10^\circ$)、资料稍少者属 B 类。

图 5 是海城地震及其全部 $M_s \geq 4.0$ 的前震和截至 1975 年 7 月的全部 $M_s \geq 4.0$ 的余震的震源机制综合图。可以看出,前震的断层面解几乎和主震的相同,都和蓼窝水库地震的不同。蓼窝水库地震具有明显的倾滑分量,而海城地震则以走滑为主。从 $M_s = 4.7$ 的最大的前震到主震,仅相隔 12 小时;而前震震中位置几乎和主震震中位置重合。在短短 12 小时内,构造运动不会使震源区的应力场发生任何可觉察的变化;而由于前震的规模不大,也只能扰动局部范围的震源区应力场。因此,前震的断层面解和主震的相同,说明在临近前震时,主震断层面附近的介质已处于应力相当集中的临界状态;还说明前震发生在应力较高的地点,它们的发生导致了破裂面边缘的应力集中,从而触发了沿此破裂面的主破裂,即主震。这也就是说,海城地震的两个较大的前震的断层面和主震的断层面的取向应当是一致的。根据这一分析,选取 $N70^\circ W$ 的节面为 4.7 级前震的断层面,选取 $N71^\circ W$ 的节面为 4.3 级前震的断层面。

余震的情况和前震不同。尽管多数余震的断层面解仍和前震、主震基本一致,但主应力轴和节面的取向明显地偏离主震的主应力轴和节面的取向。从图 5 可以看出,那些断层面解基本上和主震一致的余震大都分布在主震断层上。因此,自然选取和主震断层面相近的那个节面为其断层面。这些余震的主应力轴方向的离散说明,主震显著地扰动了整个震源区的应力场。图 6 综合了前、主、余震的主应力轴在乌尔夫网的投影。图中,大的符号表示主震的资料,带一横的小的符

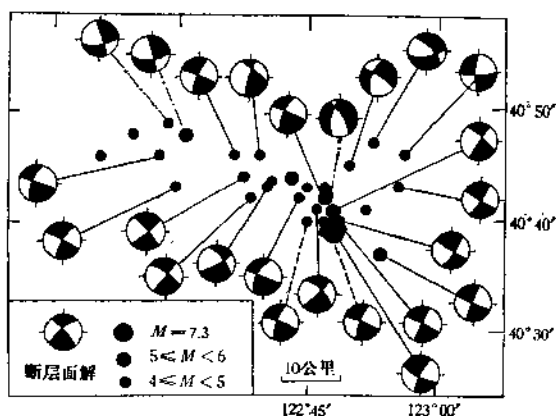


图 5 海城地震的 $M_s \geq 4.0$ 的前震和余震的震中分布及震源机制综合图

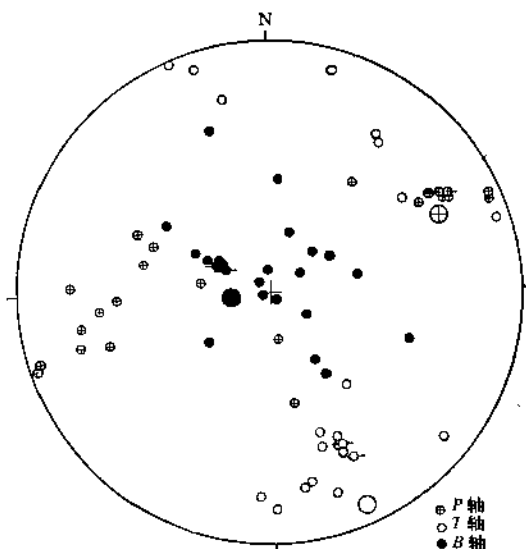


图 6 海城地震前、主、余震的主应力轴的综合图

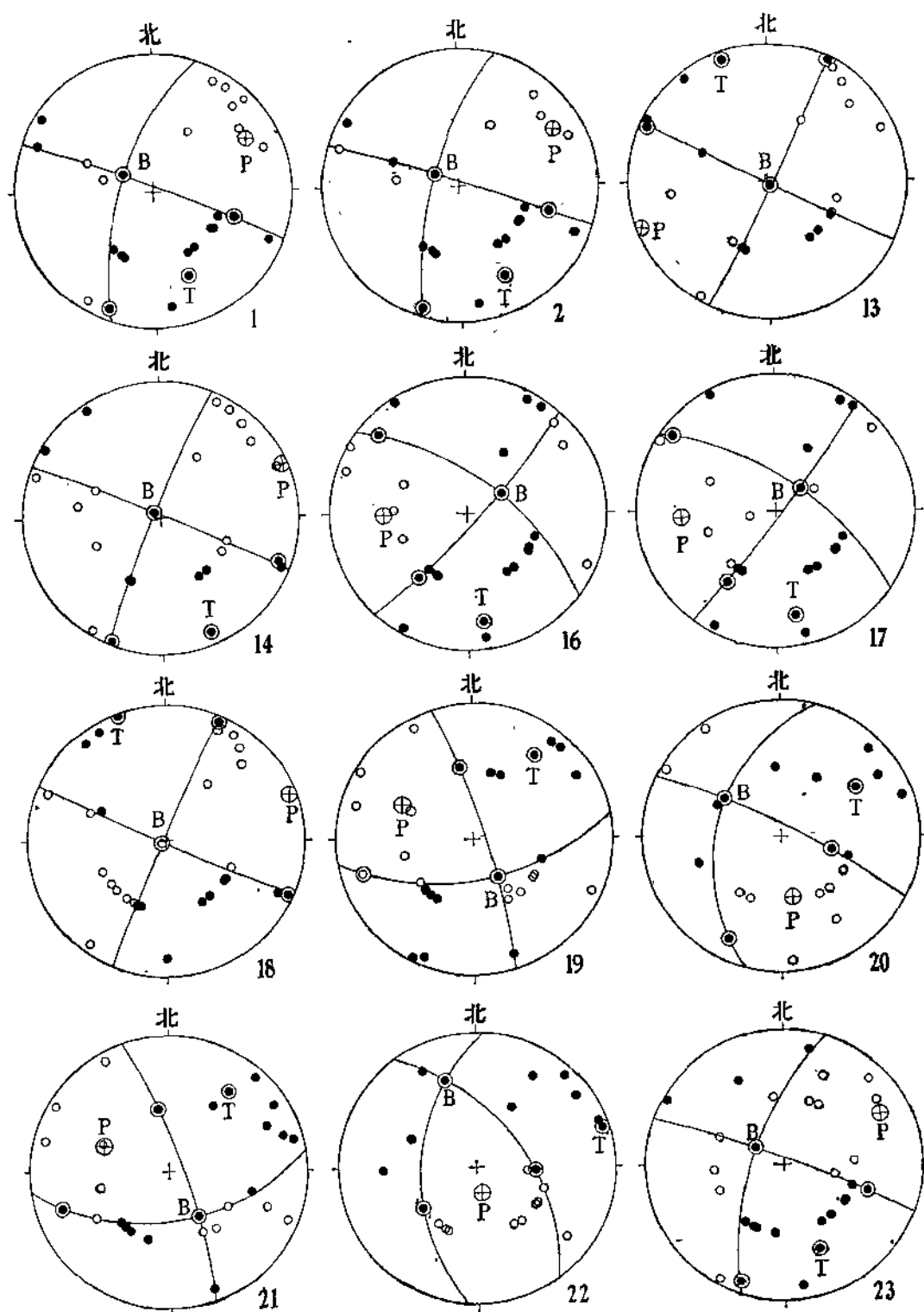
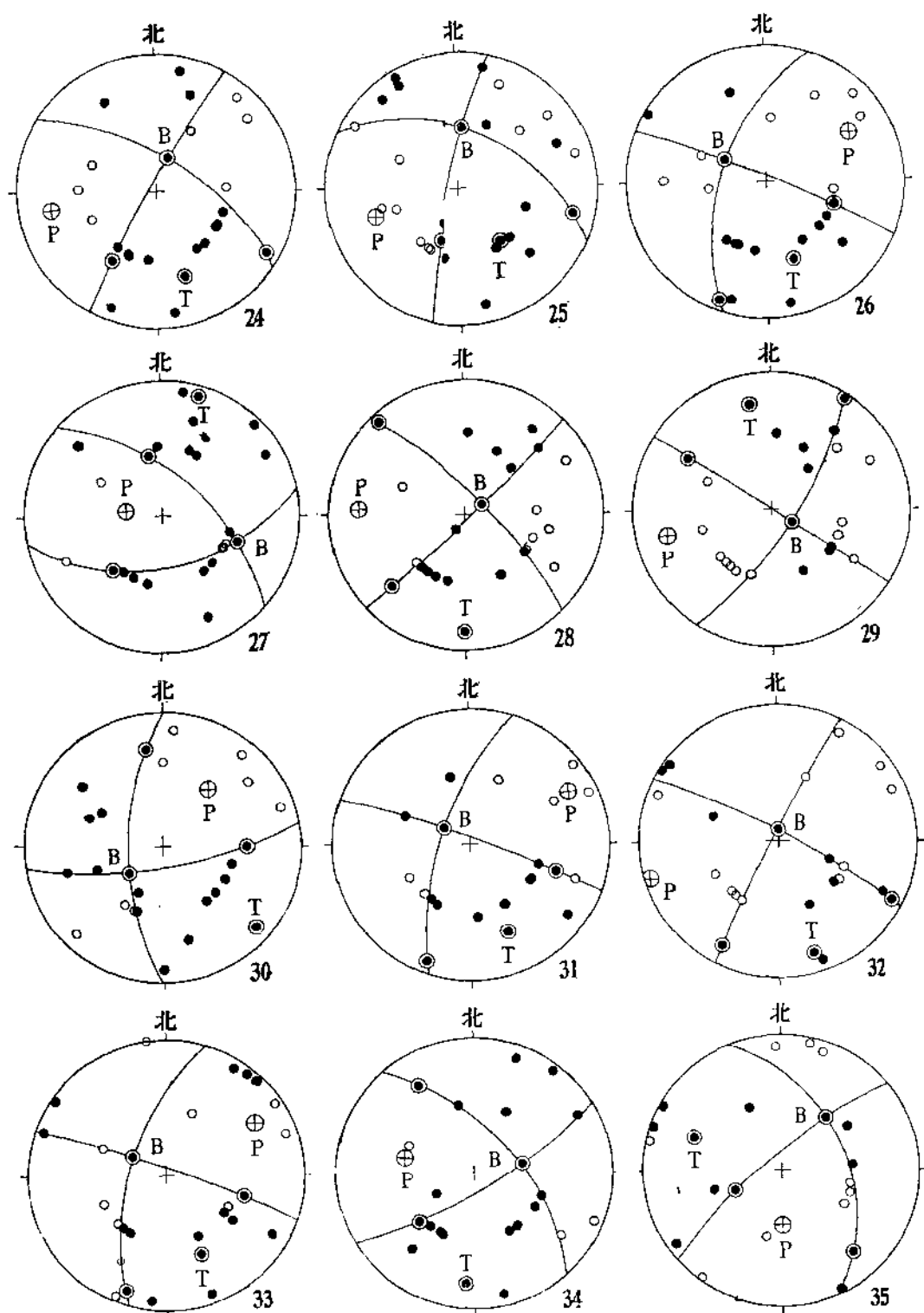


图4 海城地震系列中 $M_s \geq 4.0$ 的前震和余震及震源球上半球投影在乌尔夫网上。黑点表示初动向上,



1974 年 12 月 22 日辽阳蓼窝水库地震的断层面解。
空心圆圈表示初动向下，地震的编号和表 1 的地震的编号一致。

号表示前震的资料,不带一横的小的符号表示余震的资料。这幅图清楚地显示,尽管主压应力轴和主张应力轴的取向有些离散,但零轴的分布则相当有规则,它大体上分布在北西西向的平面上,意味着前震、主震和大多数余震具有取向大体上一致的破裂面——北西西向的破裂面。

在表 1 中,编号 19、20、21、22 等四个相继发生的 4.0 级以上地震,它们的断层面解和前震、主震以及其它余震的断层面解迥然不同。2 月 6 日,在相隔很短的时间内发生了两个 5.0 级以上地震。05 时 43 分,在主震断层的东南端发生了 5.2 级地震(编号 18),它的断层面解和主震完全相同。12 时 24 分,在主震断层的西北端,发生了 5.4 级地震(编号 19),它的断层面解和主震以及在它之前发生的 5.2 级余震完全不同。这就是,它的两个节面和主震以及 5.2 级余震的节面虽相接近,但几乎全部台站记录的纵波初动的极性都相反,主压应力轴从 $N67^{\circ}E$ 逆时针旋转了 132° ,变到 $N65^{\circ}W$ 。2 月 6 日 23 时 56 分的 4.0 级地震(编号 20)、2 月 8 日 02 时 30 分的 4.0 级地震(编号 21)和 2 月 12 日 20 时 42 分的 4.0 级地震(编号 22)也有类似的情况。出现这种情况的原因可以用主破裂在局部地段发生错动过头的假设来解释。根据余震的空间分布以及由物探方法查明的地下隐伏断层的走向(图 7),可以确定 $N79^{\circ}E$ 的节面为 5.4 级余震的断层面。主震震中靠近余震区

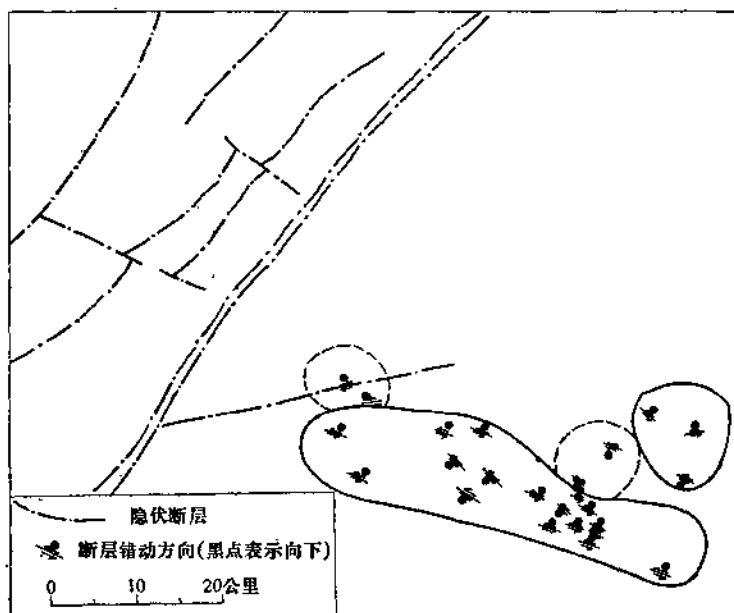


图 7 前、主、余震的断层错动方向和地下隐伏断裂的走向

的东南端,表明主破裂主要朝北西向传播,但亦朝南东向传播。当它由东南向西北传播后,终止于 5.4 级余震的震源附近,它的终止可能和在它的西边的北东向的隐伏断层的存在有关。在主破裂由东南传播至西北端时,由于已有的东西向隐伏断层的存在,破裂遂沿此断层进行,在隐伏断层最初发生破裂的部位,即其东部,应力集中程度较高,因而在这里断层两盘相对错动冲过了平衡位置,即错动过头,将一部分动能转换为介质的应变能。在余震期间的调整过程中,断层面的两盘回跳到其平衡位置,将这部分应变能释放出来,此

时,两盘的错动方向正好和主震的相反。与编号 19 的余震类似,编号 20、21 和 22 的余震的震源机制和主震的完全不同,同样可以根据上面提出的错动过头予以解释。就震源位置而言,编号 19 和 21 的余震是在东西向隐伏断裂的东部;编号 21 和 22 的余震则和主震的初始破裂点靠近。在发震的时间顺序上,这四个震源机制和主震相反的地震是在主震后不久相继发生的。既然地震断层的初始破裂点是临近主震之前应力集中的地点,那么,前一个事实说明错动过头发生在应力集中的地点;后一个事实则说明,在震源区的介质内,由于错动过头导致的局部地区的应力集中状态在力学上是不稳定的,它将很快地以相反方向的错动恢复到平衡状态。

四、一次低应力降的地震

这次地震的极震区中没有大规模的地震断裂,但在图 2a 所示的小孤山发现了一条近东西向的基岩裂缝带,在英洛及官屯一带的基岩中,也有一条北西西向、呈左旋性质的基岩裂缝,最大水平错距达 55 厘米。今以此数据作为这次地震的断层面最大水平错距的估计值,由断层面解得知,错动向量和断层走向的夹角大约为 15° , 由此可以估计这次地震的最大错距约 57 厘米。根据余震的空间分布情况,分别取余震区的长度(70 公里)和它的深度(20 公里)作为断层长度(L)和宽度(a)的估计值。由平均错距 $\Delta\bar{U}$ 和最大错距 U_m 的关系

$$\Delta\bar{U} = \frac{\pi}{4} U_m \quad (1)$$

以及地震矩 m_0 的定义

$$m_0 = \mu \Delta\bar{U} S, \quad S = La, \quad (2)$$

可以求得平均错距为 45 厘米,地震矩为 2.1×10^{26} 达因·厘米。由应力降 $\Delta\sigma$ 和最大错距与断层宽度的关系

$$\begin{cases} \Delta\sigma = \mu U_m / 2a, & \text{对于走向滑动情形,} \\ \Delta\sigma = \mu \frac{(\lambda + \mu)}{(\lambda + 2\mu)} \frac{U_m}{a}, & \text{对于倾向滑动情形,} \end{cases} \quad (3)$$

可以计算由于走向滑动引起的应力降和由于倾向滑动引起的应力降。取拉梅常数 $\lambda = \mu = 3.3 \times 10^{11}$ 达因/厘米²可以算出走滑和倾滑引起的应力降分别为 4.5 巴和 1.6 巴;从而得出应力降为 4.8 巴,应变降为 7.3×10^{-6} 。

1966 年 3 月 22 日 7.2 级邢台地震的应力降最大达 42 巴,应变降最大达 6.4×10^{-5} ,总地震矩为 1.7×10^{26} 达因·厘米^[1]。与此相比,海城地震的地震矩和邢台地震的地震矩接近,而应力降和应变降则比邢台地震的低一个数量级。

地面形变测量资料也支持这一结论。在他山、海龙山、大青山三角形中,释放的水平应变比其它三角形都大,约为 2×10^{-5} ;而邢台地震所释放的水平应变则约为 10^{-4} ;海城地震所释放的水平应变也是比邢台地震低一个数量级。

对于一个 7.3 级地震,按照震级和应力降的经验关系^[2]

$$M_L = 1.5 \lg \Delta\sigma + 5.0, \quad (4)$$

可知正常的应力降约为 34 巴。由余震区的范围估计断层面的长度和宽度虽然粗略,但基本上反映了实际情况。如果以震源最密集的区域的下部边界的深度(12 公里)作为断层宽度的估计值,那么,可算出应力降约 8 巴。这充分说明,海城地震是发生在不能积累起较高应力的薄弱地带的一次低应力降的地震。

五、前震和余震的应力降和其它震源参数

利用参考资料[3]叙述的方法,由地震纵波初动的半周期($T/2$)和振幅(A),测定了 81 个前震和余震的震源尺度($2a$)、地震矩(m_0)、应力降($\Delta\sigma$)和平均错距($\Delta\bar{u}$)。由草河掌地震台和鸡冠山地震台的记录图分别测定了上述地震的震源参数,结果见表 3。表中,以 S_1 和 S_2 分别表示草河掌台和鸡冠山台的测定结果。

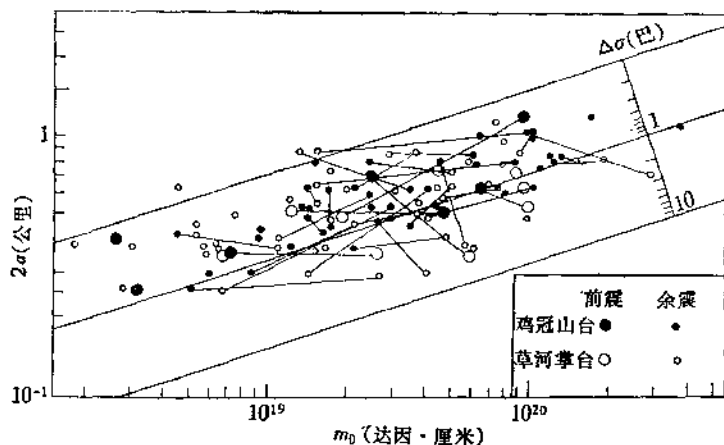


图 8 海城地震前震和余震的震源尺度、地震矩和应力降

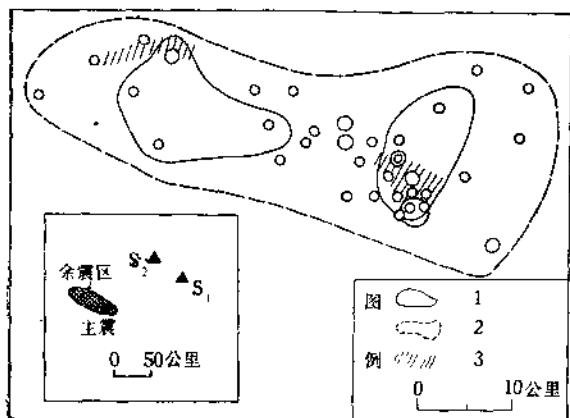


图 9 海城地震 $M_s \geq 4.0$ 的前震和余震的应力降的分布

- 1——应力降较大的地区($\Delta\sigma \geq 0.8$ 巴),
- 2——应力降较小的地区($\Delta\sigma < 0.8$ 巴),
- 3——错动过头的地区

图 9 可以看见,有两个应力降相对说来比较高(高于 0.8 巴)的地区,在这两个区域以外,

图 8 表示海城地震的前震、余震的震源尺度、地震矩和应力降。图中的斜线代表应力降的水平,凡同一地震有两个台的测定结果者,均用细直线连结。由图可见,测定结果的一致性好的,说明了测定结果的可靠程度。

测定结果表明,前震和余震的应力降都比较低,一般在 0.1—1 巴这个数量级范围内,而且都低于主震的应力降。

图 9 是 $M_s \geq 4.0$ 的地震的应力降分布图,其中的小插图表示了草河掌台(S_1)和鸡冠山台(S_2)的位置。从

表 3 海城地震的前震和余震的震源半径、地震矩、应力降和平均错距

编号	日期 年·月·日	发震时刻 时·分·秒	震中位置		深度 (公里)	震级 M_L	$T/2$ (秒)		A (微米)		a (公里)		m_0 (达因·厘米)		$\Delta\sigma$ (巴)		$\Delta\bar{u}$ (厘米)		
			北 纬	东 经			S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	
1	1975.2.3	21-22-55	40°41′	122°50′	9	3.7	0.25	0.13	0.73	0.19	0.32		9.3×10^{19}		1.3		0.088		
2	2.4	04-31-26	42	48	12	3.8	0.19		0.83		0.20		7.2×10^{19}		4.1		0.18		
3	2.4	06-13-05	40	48	13	3.7	0.18	0.27	0.68	0.13	0.18	0.35	5.7×10^{19}	2.4×10^{19}	4.1	0.25	0.17	0.019	
4	2.4	06-53-19	38	49		3.9	0.28		0.61		0.37		8.8×10^{19}		0.78		0.062		
5	2.4	06-58-19	41	50	18	4.2	0.30	0.30	0.96	0.62	0.42	0.43	1.5×10^{20}	1.3×10^{20}	0.93	0.74	0.083	0.068	
6	2.4	07-50-47	40	45	17	5.1	0.21	0.49	0.19	0.33	0.25	0.60	1.9×10^{19}	9.1×10^{19}	0.62	0.18	0.032	0.023	
7	2.4	08-57-14	39	44	16	3.9	0.20	0.21	0.11	0.33	0.26	0.26	1.2×10^{19}	4.6×10^{19}	0.28	1.2	0.17	0.069	
8	2.4	09-04-39	38	49	11	2.9		0.19		0.022		0.20		2.6×10^{18}			0.062		
9	2.4	10-28-31	48	39		3.3		0.15		0.037		0.13		3.1×10^{18}			0.019		
10	2.4	10-35-55	40	47	15	4.7	0.22	0.25	0.94	0.38	0.27	0.32	9.8×10^{19}	6.4×10^{19}	2.3	0.83	0.013	0.058	
11	2.4	10-47-19	40	50	7	2.7	0.18		0.082		0.18		6.7×10^{18}		0.52		0.020		
12	2.4	16-24-38	39	51	13	3.3	0.18	0.18	0.33	0.065	0.18	0.18	2.6×10^{19}	6.9×10^{18}	2.2	0.50	0.083	0.020	
13	2.4	20-28	35	41		4.2		0.25		0.48		0.32		7.6×10^{19}		1.1		0.074	
14	2.4	21-27-12	43	41		4.0	0.21	0.28		0.10		0.25		1.4×10^{19}		0.41		0.023	
15	2.4	21-56-46	43	47		5.0	0.21		1.94		0.25	0.38	9.8×10^{19}		3.1		0.17		
16	2.4	22-03-13	39	47		4.4	0.18		0.14		0.18		5.7×10^{18}		0.49		0.015		
17	2.4	23-32-05	48	24		4.6	0.21		0.14		0.25		7.3×10^{18}		0.21		0.011		
18	2.4	23-49-16	43	40		4.2	0.19	0.30	0.24	0.22	0.20	0.42	1.1×10^{19}	4.5×10^{19}	0.60	0.27	0.025	0.033	
19	2.5	01-01-45	43	56	10	4.8		0.30		0.074		0.41		1.5×10^{19}		0.083	0.0074		
20	2.5	02-56-29	40	49		4.9	0.16	0.21	0.58	0.18	0.15	0.24	4.0×10^{19}	2.6×10^{19}	5.7	0.83	0.18	0.043	
21	2.5	03-03-38	39	43		4.1	0.29		0.52		0.40		7.8×10^{19}		0.52		0.045		
22	2.5	03-07-13	43	45		4.7	0.39		0.35		0.58		7.2×10^{19}		0.17		0.022		
23	2.5	03-15-44	42	45		3.6	0.31	0.25	0.21	0.13	0.45	0.32	3.6×10^{19}	2.1×10^{19}	0.18	0.29	0.018	0.026	
24	2.5	05-04-26	40	50		4.5	0.18	0.28	0.70	0.23	0.18	0.38	5.7×10^{19}	4.4×10^{19}	4.4	0.33	0.17	0.027	
25	2.5	05-55-21	43	35		4.4	0.34		0.45		0.49		7.8×10^{19}		0.28		0.029		
26	2.5	06-02-29	42	44		3.7		0.22		0.093		0.26		1.3×10^{19}		0.33		0.019	
27	2.5	06-55-33	44	42		3.6	0.18		0.17		0.18		1.5×10^{19}		1.3		0.050		

表 3 (续)

编号	日期 年·月·日	发震时刻 时·分·秒	震 中 位 置		深度 (公里)	震级 M_L	$T/2$ (秒)		A (厘米)		a (公里)		m_0 (达因·厘米)		$\Delta\sigma$ (巴)		$\Delta\bar{u}$ (厘米)		
			北 纬	东 经			S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	
28	1975.2.5	09-13-39	40°43'	122°29'		4.0	0.28		0.12		0.37		1.7×10^{19}		0.16		0.013		
29	2.5	12-06-02	43	40		4.3	0.28	0.29	0.35	0.12	0.37	0.40	4.9×10^{19}	2.4×10^{18}	0.44	0.17	0.034	0.014	
30	2.5	12-33-00	41	46		4.6	0.24	0.25	0.41	0.45	0.30	0.32	4.7×10^{19}	7.6×10^{19}	0.82	0.85	0.052	0.059	
31	2.5	13-07-42	40	43		4.0	0.23		0.10		0.28		1.2×10^{19}		0.26		0.016		
32	2.5	14-39-02	40	45		3.6	0.23	0.25	0.12	0.084	0.28	0.32	1.5×10^{19}	1.4×10^{19}	0.31	0.18	0.019	0.012	
33	2.5	15-39-48	40	39		4.0	0.21	0.25	0.16	0.16	0.25	0.32	1.7×10^{19}	2.5×10^{19}	0.46	0.33	0.025	0.023	
34	2.5	18-41-23	42	29		4.1	0.31	0.25	0.076	0.21	0.44	0.32	1.3×10^{19}	3.4×10^{19}	0.067	0.45	0.0057	0.031	
35	2.5	19-30-47	43	32		4.4	0.31	0.31	0.17	0.28	0.44	0.44	2.9×10^{19}	5.8×10^{19}	0.16	0.31	0.015	0.028	
36	2.5	21-02-13	41	43		4.1	0.30		0.35		0.42		5.7×10^{19}		0.35		0.032		
37	2.5	23-52-54	42	38		5.0	0.25	0.30	0.11	0.43	0.32	0.41	1.4×10^{19}	8.7×10^{19}	0.21	0.50	0.015	0.045	
38	2.6	05-43-43	37	54	23	5.5	0.31	0.38	0.090	0.39	0.44	0.54	1.5×10^{19}	9.7×10^{19}	0.088	0.25	0.0083	0.029	
39	2.6	08-05-42	44	32		3.6	0.25		0.052		0.32		6.7×10^{18}		0.093		0.0067		
40	2.6	12-24-57	48	30	17	5.7	0.25	0.68	1.7		0.32	1.1	2.0×10^{20}		2.8		0.20		
41	2.6	23-56-16	45	50		4.5	0.16	0.25	0.21	0.24	0.15	0.32	1.4×10^{19}	4.1×10^{18}	2.1	0.58	0.067	0.041	
42	2.7	18-31-46	41	50	15	4.2	0.25	0.20	0.39	0.27	0.32	0.23	4.7×10^{19}	3.5×10^{19}	0.67	1.3	0.048	0.066	
43	2.8	02-30-04	49	40	12	4.5	0.25		0.035		0.32		4.4×10^{18}		0.062		0.0043		
44	2.8	02-30-23	49	30	12	4.5		0.22		0.17		0.27		2.4×10^{19}		0.54		0.032	
45	2.8	18-10-48	38	47	2	2.2	0.15		0.044		0.13		2.8×10^{18}		0.62		0.017		
46	2.8	21-48-18	46	43	10	4.0	0.15	0.22	0.10	0.20	0.13	0.26	6.7×10^{18}	2.9×10^{19}	1.3	0.74	0.035	0.041	
47	2.9	00-58-38	40	43	7	3.8	0.18	0.22	0.18	0.10	0.19	0.26	1.6×10^{19}	1.4×10^{19}	1.0	0.33	0.041	0.019	
48	2.9	05-52-22	39	40	10	4.3	0.18	0.19	0.12	0.037	0.19	0.21	1.1×10^{19}	4.4×10^{18}	0.78	0.21	0.031	0.0099	
49	2.9	10-30-24	43	43	10	4.1	0.20	0.16	0.21	0.093	0.23	0.15	2.1×10^{19}	8.7×10^{18}	0.83	1.2	0.041	0.040	
50	2.9	14-26-54	42	47	6	3.6		0.24		0.15		0.30		2.4×10^{19}		0.39		0.025	
51	2.9	21-35-09	37	52	2	4.1	0.18		0.035		0.19		3.0×10^{18}		0.18		0.072		
52	2.10	23-38-40	42	49	9	3.6	0.20		0.052		0.23		5.2×10^{18}		0.20		0.93		
53	2.11	02-51-51	44	46	7	4.1	0.18		0.070		0.19		6.2×10^{18}		0.41		0.017		
54	2.11	10-03-48	39	47	12	4.3	0.18		0.68		0.19		5.7×10^{19}		3.6		0.15		

表 3 (续)

编号	日期 年.月.日	发展时刻 时-分-秒	震中位置		深度 (公里)	震级 M_L	$T/2$ (秒)		A (微米)		a (公里)		m_0 (达因·厘米)		$\Delta\sigma$ (巴)		$\Delta\bar{u}$ (厘米)	
			北 纬	东 经			S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2	S_1	S_2
55	1975.2.11	11-21-36	40°43'	122°42'	10	2.2	0.18		0.021		0.19		1.8×10^{18}		0.12		0.047	
56	2.11	15-04-04	40	45	16	3.8	0.18		0.073		0.19		6.2×10^{18}		0.41		0.017	
57	2.11	16-10-27	42	44	9	4.0	0.25		0.035		0.32		4.4×10^{18}		0.062		0.043	
58	2.12	19-11-00	41	33	11	3.6	0.19		0.056		0.21		5.2×10^{18}		0.26		0.012	
59	2.12	20-42-46	42	47	7	4.5	0.21	0.25	0.39	0.61	0.25	0.32	4.0×10^{19}	9.9×10^{19}	1.1	1.4	0.057	0.099
60	2.13	05-51-39	43	48	8	4.1	0.19	0.18	0.51	0.20	0.21	0.19	4.7×10^{19}	2.1×10^{19}	2.6	1.4	0.12	0.058
61	2.15	15-26-14	43	47	7	3.8	0.15	0.20	0.34	0.074		0.22	9.2×10^{18}	9.2×10^{18}		0.54		0.025
62	2.15	21-08-04	39	47	12	5.8		0.19		0.078		0.21	9.1×10^{18}	9.1×10^{18}		0.41		0.018
63	2.16	22-01-20	41	48	11	5.6	0.30	0.29	1.2	0.55	0.42	0.39	1.9×10^{20}	1.1×10^{20}	1.1	0.83	0.098	0.070
64	2.17	12-33-13	43	42	9	4.4		0.20	0.13		0.23		1.7×10^{19}	1.7×10^{19}		0.58		0.028
65	2.18	18-51-49	47	42	16	4.7	0.27	0.37	0.21	0.41	0.36	0.52	2.9×10^{19}	9.9×10^{19}	0.28	0.25	0.22	0.028
66	2.20	16-41-05	40	50	8	3.6		0.16	0.065		0.15		5.9×10^{18}	5.9×10^{18}		0.78		0.026
67	2.21	06-26-17	41	40	6	4.4	0.25		0.23		0.32		3.0×10^{19}		0.41		0.028	
68	2.22	15-45-14	42	44	12	4.8		0.41	0.63		0.60		1.7×10^{20}	1.7×10^{20}		0.31		0.041
69	2.24	05-07-20	47	53	7	5.0		0.35	0.28		0.51		6.4×10^{19}	6.4×10^{19}		0.21		0.023
70	2.24	06-01-47	41	49	5	4.0		0.18	0.10		0.19		1.2×10^{19}	1.2×10^{19}		0.74		0.030
71	2.25	04-52-10	44	37	14	5.0		0.30	0.59		0.40		1.2×10^{20}	1.2×10^{20}		0.83		0.073
72	2.26	05-09-53	40	49	8	4.8	0.31	0.38	0.56	0.40	0.43	0.54	8.8×10^{19}	1.0×10^{20}	0.52	0.25	0.049	0.028
73	2.26	07-06-56	39	41	3	4.2	0.22	0.19	0.33	0.13	0.27	0.21	3.7×10^{19}	1.6×10^{19}	0.93	0.74	0.052	0.033
74	2.27	09-19-57	42	57	7	4.0	0.18		0.27		0.19		5.7×10^{18}		0.36		0.015	
75	2.27	13-44-43	43	44	11	4.0	0.16	0.15	0.035	0.059	0.15	0.13	2.6×10^{19}	5.0×10^{18}	3.3	1.1	0.10	0.030
76	2.28	05-10-02	55	56	15	4.0	0.20	0.21		0.21	0.23	0.25	2.9×10^{19}	2.9×10^{19}		0.83		0.045
77	2.28	11-56-13	42	47	6	4.4		0.22	0.26		0.26		3.7×10^{19}	3.7×10^{19}		0.99		0.055
78	3.21	11-32-59	46	57	11	4.5		0.30	0.61		0.42		1.2×10^{20}	1.2×10^{20}		0.74		0.068
79	3.29	23-16-36	46	36	6	4.6		0.29	0.32		0.40		6.1×10^{19}	6.1×10^{19}		0.41		0.035
80	4.10	03-55-37	43	29	10	5.0		0.37	1.4		0.55		3.7×10^{20}	3.7×10^{20}		0.91		0.11
81	4.21	00-17-06	46	27	8	4.6		0.22	0.30		0.27		4.3×10^{19}	4.3×10^{19}		0.99		0.058

应力降低于 0.8 巴。对比图 9 和图 7, 我们看到, 高应力降地区对应于主破裂错动过头的部位, 反映震前高应力、错动过头、震源机制反向和相对高应力降四者之间的内在联系。海城地震这个震例说明后三者是震前高应力的表现和结果。

六、结 语

以上分析表明, 海城地震是一个近乎直立的北西西向断层面的左旋—正剪切错动。这个结果意味着, 虽然在我国东北和华北地区, 主压应力轴的取向都是北东东—南西西向, 但破裂面的方向却不限于北北东方向; 与北北东方向共轭的北西西方向的破裂同样是可能的。因此, 在分析这个地区的地震危险性时, 北北东向的构造带、北西西向的构造带及其交汇地区均要给予注意。

前震的机制与主震的相同, 而余震的机制与主震的不尽相同。与主震机制相反的若干强余震可能是由于主破裂在局部地段发生错动过头以后的回跳引起的。

和震级相近的其它浅源大地震相比, 海城 7.3 级地震的地震矩与它们相当, 但应力降则低一个数量级, 是一次低应力降的地震。前震和余震的应力降也较低。在应力降都相当低的背景下, 有两个应力降相对高的地区。从所得结果看来, 主震前的高应力地区与主震的初始破裂点、错动过头部位、强余震的滑动向量反向以及应力降可能有内在的联系。为了查明这些关系, 有必要对其它地震系列进行类似的测定和分析。而为了鉴别前震和一般小地震, 着重对大震的前震和一般小地震的震源参数进行系统的测定和分析也是很有意义的。本文涉及的结果仅是这方面工作的一个开始。

参 考 资 料

- [1] 陈运泰等, 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程, 地球物理学报, **18**, 3, 164—182, 1975.
- [2] S. J. Gibowicz, Stress drop and aftershocks, *Bull. Seism. Soc. Amer.*, **63**, 4, 1433—1446, 1973.
- [3] 陈运泰等, 巧家、石棉的小震震源参数的测定及其地震危险性的估计, 地球物理学报, **19**, 3, 206—233, 1976.

FOCAL MECHANISM OF HAICHENG (海城), LIAONING PROVINCE, EARTHQUAKE OF FEBRUARY 4, 1975

GU HAO-DING

(The Seismological Bureau of Liaoning Province)

CHEN YUN-TAI

(Institute of Geophysics, Academia Sinica)

GAO XIANG-LIN

(The Seismological Brigade of the Ningxia
Hui Nationality Autonomous Region)

ZHAO YI

(The Seismological Brigade of Guangzhou,
National Seismological Bureau)

Abstract

Fault plane solutions are obtained from data of the first motions for 24 earthquakes with $M_s \geq 4.0$ of the Haicheng earthquake sequence, the mainshock of which occurred on Feb. 4, 1975. One of the nodal planes of the mainshock strikes $N 70^\circ W$, dipping 80° to the NE. while the other nodal plane strikes $N 23^\circ E$, dipping 75° to the SE. Based on the data of the spatial distributions of the after shocks and the ground deformations, the $N 70^\circ W$ nodal plane is taken as the fault plane. The faulting is nearly a vertical, left-lateral strike-slip with a minor component of normal dip-slip movement. While the focal mechanisms of all the foreshocks and most of the aftershocks are similar to that of the mainshock, those of 4 aftershocks with $M_s \geq 4.0$ are remarkably different from the mainshock. They represent a faulting with slip vector reversed in direction to that of the mainshock. One possible explanation for these exceptions is that during the mainshock the fault movement overshot along some segments of the fault.

The source parameters of the mainshock are calculated from the data of field observations and spatial distributions of the aftershocks. The fault length, width, average dislocation, seismic moment, and stress-drop, of the mainshock, are estimated as 70 km, 20km, 45 cm, 2.1×10^{28} dyne-cm, 4.8 bars, respectively. It is a low stress-drop earthquake occurring in a weak zone that is incapable of accumulating higher stresses.

For 81 foreshocks and aftershocks the source dimensions, seismic moments, stress-drops as well as average dislocations are calculated from the data of the first half cycles and amplitudes of the seismic P -waves. The results indicate that the stress-drops are rather low, and generally in the range of 0.1–1.0 bars, for both the foreshocks and aftershocks. There are two regions with relatively higher stress-drops (≥ 0.8 bars), which correspond to the overshooting portions on the main fracture. These results imply that there might be some intrinsic connections between higher initial stresses before the mainshock, overshooting of fault movement, relatively higher stress-drops, and reverse of the slip vectors of focal mechanisms. It seems that the latter three phenomena are the results of the relatively higher initial stress.