

中国大陆不同类型地震序列的 固体潮应力位相特征*

高锡铭 王威中

(国家地震局地震研究所)

摘 要

本文研究了中国大陆 131 个强震序列的潮汐应力的位相分布特征。

关于潮汐最大剪应力所得到的结果是：对单发型地震序列和主发型地震序列，它们的主震位相都有明显的优势分布，而单发型地震序列的主震优势位相比主发型地震序列的主震优势位相高；在群发型地震序列中，可以区分出若干明显的丛集，由每个丛集的主震所组成的序列位相依次呈降低趋势；各种序列晚期强余震的位相也具有明显的优势分布。

不同类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相和潮汐流体静应力的位相组合特征，具有较明确的物理意义，它与岩石力学实验中的 A 型和 B 型加载的应力途径^[8,9]，其实验结果有一定的对应关系。

一、引 言

文献[1]讨论了固体潮应力张量对地震的触发作用，指出潮汐最大剪应力与强震的震发时刻有一定的相关性。岩石力学实验^[2-9]认为可以把地震序列划分为几种不同的类型。归纳而言，产生不同类型地震序列的因素是介质的均匀程度^[2,3]和应力状态^[4]，包括应力速率^[5]、应力历史^[6,7]和应力途径^[8,9]等。如果我们考虑地壳介质处于将要发生地震的临界状态，那末应力速率对地震序列类型的影响便表现得比较明显^[9]。因此有必要研究不同类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相特征。此外，地壳介质达到临界状态可以通过不同的应力途径，潮汐应力不同分量的位相组合特征有可能是应力途径的一个反映。

地震序列的统计研究是按照主震与全序列的能量比和震级分布关系，把地震序列划分为孤立型、主震型和震群型^[10,11]。在震群型地震序列中还可以区分两种情况：一种是能量基本上由一个地震频率密集的丛集释放的；另一种是能量由几个地震频率密集的丛集释放的。如果用丛集的能量与全序列的能量比作为指标，那末前一种情况的地震序列类型便与主震型地震序列是一样的，似应把它归为主震型。从而我们采用单发型（就是孤立型）、主发型（包括主震型和通过一个主要丛集释放能量的震群型）和群发型（通过两个或两个以上的丛集释放能量的震群型）划分地震序列。这种划分可以避免文献[10,11]中划分判据的能量比不连续现象，因而更接近实际。我们研究了这三种不同类型地震序列的

* 1981年6月22日收到初稿，1982年10月22日收到修改稿。

潮汐应力分量的位相分布特征.

二、不同类型地震序列的潮汐应力位相特征

取我国大陆 1920 年到 1966 年的 $M_s \geq 6.0$ 级和 1967 年到 1980 年 6 月的 $M_s \geq 5.0$ 级的全部可以确认序列类型的 131 个地震序列. 确认地震序列类型时使用了文献[12—14], 并参考了文献[10]、[11].

用文献[1]的方法, 给出地震潮汐流体静应力的位相 ϕ_1 和潮汐最大剪应力的位相 ϕ_2 . 表 1—3 分别给出单发型地震序列的主震, 主发型地震序列的主震和群发型地震序列每个丛集的主震位相 ϕ_1 和 ϕ_2 . 表 4 给出三种类型序列分组的统计参数, 这些参数是几率 P_r 、等效矢量模 r 、优势位相 ϕ 和位相平均变化范围 $\Delta\phi$, 它们分别定义为:

$P_r = \exp\left(-\frac{R^2}{n}\right)$ 同文献 [1], 在一组统计中, P_r 越小触发地震的可能性越大.

$$r = \frac{R}{n}$$

$$\phi = \cos^{-1} \frac{R_x}{R}$$

$$\Delta\phi = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |\phi - \phi_j|$$

其中 $R^2 = \left(\sum_{i=1}^n \sin \phi_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n \cos \phi_i\right)^2$

$$R_x = \sum_{j=1}^n \cos \phi_j$$

n 为地震数

图 1 为全部 131 个地震序列的主震(对群发型地震序列指的是最后一个丛集的主震)潮汐流体静应力位相 ϕ_1 和潮汐最大剪应力位相 ϕ_2 的分布图. 显然, 主震的发震时刻与潮汐最大剪应力位相有一定的相关性, 等效矢量模为极限等效矢量模 $r_0 = 0.29$ 的 83%,

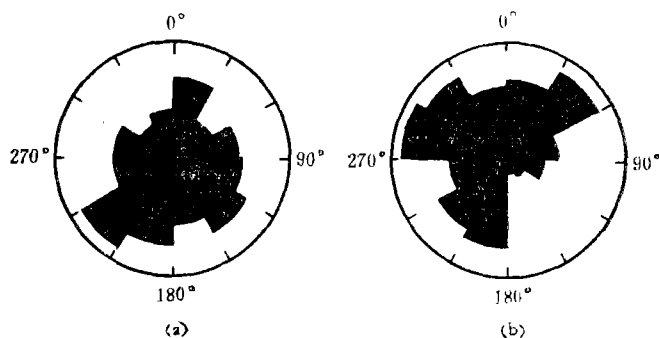


图 1 131 个地震序列的主震潮汐应力位相分布

(a)——潮汐流体静应力 (b)——潮汐最大剪应力

表 1 单发型地震序列主震的潮汐应力位相 ϕ_1 、 ϕ_2

编号	地震时间		震 源 位 置			震级	地 点	ϕ_1	ϕ_2
	年·月·日	时-分	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)				
1	1959.6.28	3-11	41°9	80°0	*	6 3/4	新疆温宿	207°	36°
2	1967.7.28	13-56	40°6	115°8	10	5 1/2	河北怀来	299°	84°
3	8.20	7-32	32°7	106°8		4.8	四川南江	215°	33°
4	1968.3.3	0-17	29°9	100°3	10	5.7	四川理塘	279°	77°
5	1969.7.26	6-50	21°7	111°8	5	6.4	广东阳江	272°	86°
6	1970.7.31	21-11	28°6	103°7	44	5.4	四川马边	244°	70°
7	11.16	12-58	43°4	81°2	4	5.4	新疆伊宁	132°	48°
8	12.3	3-13	35°9	105°6	15	5.1	宁夏西吉	5°	173°
9	1971.3.24	21-54	35°5	98°1	13	6.3	青海都兰	299°	106°
10	1972.4.8	17-34	29°5	101°9	28	5.2	四川泸定	266°	65°
11	1973.6.3	7-57	44°3	83°7	32	6.0	新疆精河	201°	18°
12	1974.4.22	8-29	31°4	119°3		5.5	江苏溧阳	270°	92°
13	6.15	18-20	31°6	100°0	13	5.0	四川甘孜	237°	58°
14	9.29	23-52	40°5	77°9	15	5.5	新疆阿合奇	296°	116°
15	1975.1.14	22-14	43°7	87°0	27	4.8	新疆乌鲁木齐	228°	49°
16	7.9	21-56	23°9	103°3	32	5.1	云南开达	241°	55°
17	1976.4.6	0-55	40°2	112°1	18	6.2	内蒙和林格尔	227°	69°
18	8.29	0-23	43°9	114°2		5.3	内蒙阿巴嘎	301°	134°
19	1977.11.22	19-34	44°1	87°1		4.6	新疆乌苏	179°	0°
20	1978.4.22	23-04	41°9	85°9	26	5.8	新疆库尔勒	261°	81°
21	8.16	22-56	38°3	101°0	35	5.0	甘肃民乐	326°	147°
22	1979.3.29	10-01	41°9	83°5		6.0	新疆库车	216°	36°
23	5.22	6-46	31°1	110°5	16	5.1	湖北秭归	270°	108°
24	6.19	12-15	37°1	111°9		5.1	山西介休	75°	287°
25	7.25	20-55	34°5	105°3	20	5.0	甘肃礼县	194°	14°
26	1980.2.10	12-46	48°8	121°8	18	5.6	内蒙博克图	217°	9°

而发震时刻与潮汐流体静应力位相的相关性不很明显，等效矢量模不足极限等效矢量模 r_0 的一半。关于潮汐最大剪应力和潮汐流体静应力的类似结果，在文献[1]中已经得出。

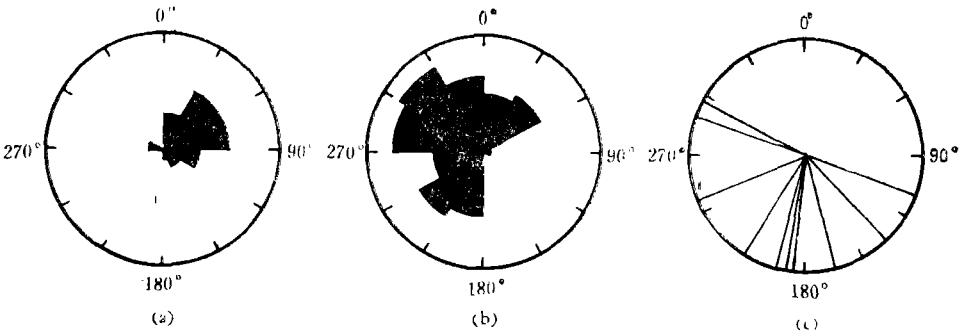


图 2 不同类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相分布
(a)——26 个单发型地震序列的主震
(b)——95 个主发型地震序列的主震
(c)——10 个群发型地震序列的最后一个丛集的主震

表 2 主发地震序列主震的潮汐应力位相 ϕ_1 、 ϕ_2

编号	地震时间		震源位置			震级	地 点	ϕ_1	ϕ_2
	年·月·日	时-分	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)				
1	1920.12.16	20-05	36°5	105°7		8.5	甘肃海原	132°	312°
2	1923.3.24	20-40	31°5	101°0		7 $\frac{1}{4}$	四川道孚	61°	272°
3	1925.3.16	22-42	25°7	100°4		7.0	云南大理	135°	318°
4	1926.6.4	14-51	35°0	89°5		6.0	西藏曼特略木湖	191°	344°
5	1927.5.23	6-33	37°7	102°2		8.0	甘肃古浪	347°	220°
6	1931.8.11	5-19	47°1	89°8		8.0	新疆富蕴	259°	21°
7	1932.4.6	17-11	31°4	115°0		6.0	湖北麻城	131°	314°
8	1936.2.7	16-56	35°4	103°4		6 $\frac{3}{4}$	甘肃康乐	127°	305°
9	1937.1.7	21-21	35°5	97°6		7 $\frac{1}{2}$	青海都兰	325°	183°
10	1939.2.23	23-41	42°5	82°5		6.0	新疆库车	198°	18°
11	1944.9.28	0-25	39°1	75°0		7.0	新疆喀什	15°	223°
12	1948.5.25	15-11	29°7	100°3		7 $\frac{1}{4}$	四川理塘	17°	197°
13	6.27	8-08	26°4	99°7		6 $\frac{1}{4}$	云南剑川	112°	304°
14	1950.2.3	7-34	21°7	100°1		7.0	云南勐海	168°	347°
15	8.15	22-10	28°4	96°7		8 $\frac{1}{2}$	西藏察隅	215°	32°
16	1951.3.17	12-28	30°9	97°4		6.0	西藏昌都	251°	277°
17	11.18	17-36	31°3	91°4		8.0	西藏当雄	59°	234°
18	12.27	0-31	39°6	95°7		6.0	甘肃肃北	7°	187°
19	1954.2.11	8-30	39°0	101°3		7 $\frac{1}{4}$	甘肃山丹	150°	180°
20	7.31	9-00	38°8	104°2		7.0	甘肃民勤	231°	51°
21	1955.1.29	1-03	33°3	82°4		6 $\frac{1}{2}$	西藏西堤	229°	39°
22	4.14	9-29	30°0	101°8		7 $\frac{1}{2}$	四川康定	195°	309°
23	4.24	20-59	44°2	83°6		6 $\frac{1}{2}$	新疆精河	126°	309°
24	6.7	8-49	26°5	101°1		6.0	云南华坪	226°	45°
25	9.23	23-6	26°6	101°8		6 $\frac{3}{4}$	云南永仁	208°	324°
26	1957.4.14	15-12	30°6	84°3		6 $\frac{1}{2}$	西藏阿木中	28°	208°
27	1958.10.28	18-47	30°6	84°5		6 $\frac{1}{4}$	西藏阿木中	144°	323°
28	1960.11.9	18-44	32°8	103°7	5	6 $\frac{3}{4}$	四川松潘	75°	264°
29	1961.6.4	15-33	34°2	81°9		6.5	西藏查罗尔错	283°	83°
30	1962.3.19	4-19	23°7	114°7	5	6.4	广东河源	137°	311°
31	5.21	20-03	37°1	96°0	25	6.8	青海北霍布逊湖	137°	316°
32	6.24	9-21	25°2	101°2		6.2	云南南华	98°	292°
33	1965.7.3	19-26	22°4	101°6	15	6.1	云南江城	78°	254°
34	1966.9.28	22-00	27°3	100°4	8	6.4	云南中甸	275°	96°
35	1967.3.27	16-58	38°5	116°5	30	6.3	河北河间	105°	280°
36	5.11	22-51	39°3	73°8	33	5.9	新疆乌鲁木齐提	168°	349°
37	8.15	17-20	31°1	93°6	25	5.5	西藏比如	160°	356°
38	8.30	12-22	31°6	100°3	10	6.8	四川炉霍	58°	260°
39	1968.3.16	20-27	25°3	101°1	13	5.1	云南南华	176°	356°
40	12.22	17-07	36°2	101°9	7	5.4	青海化隆	76°	260°
41	1969.2.12	6-08	41°5	79°3	10	6 $\frac{1}{2}$	新疆乌什	142°	354°
42	1970.1.5	1-01	24°2	102°7	10	7.7	云南通海	51°	237°
43	2.7	6-11	23°1	101°0	15	6.2	云南普洱	117°	302°

续表 2

编号	地震时间		震源位置			震级	地 点	ϕ_1	ϕ_2
	年·月·日	时·分	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)				
44	2.24	10-08	30°6	103°3	15	6.2	四川大邑	223°	48°
45	3.27	11-49	39°7	75°3	34	5.0	新疆乌恰	329°	346°
46	9.5	21-38	32°1	101°3	20	5.5	四川壤塘	206°	18°
47	1971.2.5	17-11	25°1	99°4	14	5.8	云南保山	225°	30°
48	4.28	23-22	23°0	101°0	33	6.7	云南普洱	225°	36°
49	1971.5.23	4-04	32°4	92°2	20	6.5	西藏聂荣	120°	294°
50	7.26	9-49	39°9	77°1	45	5.7	新疆伽师	167°	344°
51	11.1	13-30	44°0	84°9		5.0	新疆乌苏	20°	196°
52	1972.1.16	4-22	40°3	79°0	10	6.2	新疆柯坪	42°	225°
53	1.23	10-06	23°5	102°6	6	5.6	云南石屏	119°	270°
54	7.23	0-41	31°5	91°7	15	6.0	西藏那曲	27°	213°
55	9.4	0-48	35°9	73°4	23	6.5	中巴交界	347°	195°
56	11.13	1-57	38°4	73°2	103	5.8	新疆喀什	301°	37°
57	1973.2.6	18-37	31°2	100°7	17	7.9	四川炉霍	106°	282°
58	8.11	15-16	32°9	104°0	8	6.5	四川南坪	84°	275°
59	12.31	19-01	38°5	116°5	19	5.3	河北里坦	64°	279°
60	1974.5.11	3-25	28°2	104°1	8	7.1	云南永善大关	357°	192°
61	6.5	8-02	29°4	99°6	20	5.2	四川巴塘	223°	42°
62	7.5	3-31	45°0	94°1		7.1	新疆苏海图	64°	240°
63	8.11	9-14	39°0	73°8		7.3	新疆喀什	2°	227°
64	9.23	22-51	33°8	102°6	11	5.6	四川若尔盖	247°	281°
65	1975.1.12	5-23	25°1	101°6	34	5.5	云南楚雄	112°	296°
66	1.15	19-35	29°5	101°8	25	6.2	四川九龙	152°	337°
67	2.4	19-36	40°6	122°8	12	7.3	辽宁海城	358°	213°
68	5.5	13-19	33°3	93°0	12	6.4	青海西藏交界	78°	282°
69	10.28	7-19	21°6	101°7		5.7	云南勐腊	3°	183°
70	1976.7.28	3-42	39°4	118°1	15	7.8	河北唐山	104°	287°
71	9.23	4-07	39°9	106°4	20	6.2	宁夏磴口	124°	304°
72	1977.1.2	5-40	38°2	91°2	16	6.4	青海西北	130°	321°
73	1.19	8-46	37°1	95°8	18	6.3	青海北部	174°	355°
74	7.23	14-57	42°3	83°5	30	5.4	新疆库车	218°	29°
75	10.19	10-45	23°4	107°6	12	5.0	广西平果	120°	324°
76	12.16	18-15	33°3	97°3	18	5.3	青海玉树	344°	216°
77	12.19	0-47	39°9	77°3		6.2	新疆喀什	44°	269°
78	1978.7.13	5-49	31°9	102°9	12	5.4	四川黑水	330°	203°
79	10.8	22-20	39°5	74°7		5.7	新疆乌恰	113°	267°
80	1979.2.2	9-08	40°0	90°7		5.1	新疆阿尔金山	112°	281°
81	2.6	22-45	48°9	116°7		5.1	黑龙江	19°	222°
82	3.2	15-20	33°1	117°4		5.0	安徽固镇	13°	217°
83	3.5	6-11	39°8	118°5		5.0	河北雷庄	80°	198°
84	7.5	18-57	31°5	119°3	12	6.0	江苏溧阳	190°	11°
85	1980.2.2	20-29	27°9	101°2		5.0	四川木里	202°	23°
86	2.14	6-10	36°9	77°2		5.8	新疆叶城	119°	304°

续 表 2

编号	地震时间		震源位置			震级	地 点	ϕ_1	ϕ_2
	年·月·日	时-分	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)				
87	6.18	5-46	23°5	102°6		5.5	云南蒙自	32°	239°
88	1955.4.15	11-41	39°9	74°6		7.0	新疆乌恰	254°	276°
89	1969.9.14	22-46	39°9	75°0		5.5	新疆乌恰	210°	30°
90	1970.11.29	10-04	41°6	81°8	15	5.0	新疆拜城	177°	2°
91	1971.4.3	12-49	32°2	95°1	20	6.3	青海杂多	180°	299°
92	8.16	12-58	28°9	103°8	24	5.9	四川马边	70°	254°
93	1972.8.30	23-14	36°7	94°4	15	5.5	青海格尔木	206°	8°
94	1976.5.29	20-23	24°5	99°0	24	7.3	云南龙陵	180°	360°
95	8.16	22-07	32°8	104°3	24	7.2	四川松潘	182°	338°

注：88—95 为通过一个丛集释放能量的主发型地震序列的主震。

进一步的工作是按照地震序列的不同类型研究它们的潮汐应力位相特征。

1 单发型地震序列和主发型地震序列，主震的潮汐最大剪应力的位相分布特征

图 2(a、b) 给出了单发型地震序列和主发型地震序列的主震潮汐最大剪应力位相分布。单发型地震序列和主发型地震序列，其主震对潮汐最大剪应力位相均有明显的优势分布，对 26 个单发型地震序列有 $P_r = 3.6 \times 10^{-6}$ ，优势位相 $\phi_{2单} = 67^\circ$ ，对 95 个主发型地震序列有 $P_r = 6.8 \times 10^{-9}$ ，优势位相 $\phi_{2主} = 300^\circ$ 。

2 群发型地震序列的潮汐最大剪应力的位相特征

群发型地震序列可以明显地区分为若干个频度密集的丛集，由每个丛集的主震所组成的序列的潮汐，最大剪应力的位相依次呈下降趋势（见表 3）。在群发型地震序列中，可以辨认的最后一个丛集主震的潮汐，最大剪应力的位相也呈现明显的优势分布，图 3(c) 给出仅有的十个群发型地震序列，最后一个丛集主震的潮汐最大剪应力的位相分布， $P_r = 4.1 \times 10^{-4}$ ，对于 $n = 10$ ，这个结果是好的，优势位相 $\phi_{2群} = 198^\circ$ 。

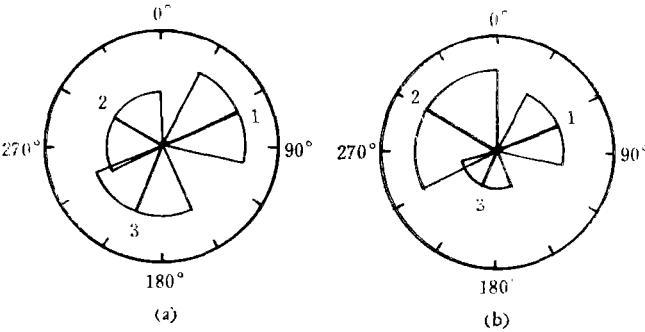


图 3 三种类型地震序列主震的潮汐最大剪应力的优势位相、位相平均变化范围和等效矢量模关系图

(1) 单发型地震序列的主震 (2) 主发型地震序列的主震 (3) 群发型地震序列最后一个丛集的主震 图(a)是按表4中 $r, \phi, \Delta\phi$ 的数值绘出的 图(b)是对地震序列数目归一化之后的结果

表 3 群发型地震序列各丛集主震的潮汐应力位相 ϕ_1 、 ϕ_2

编号	丛集	地震时间		震源位置			震级	地点	ϕ_1	ϕ_2	备注
		年·月·日	时-分	$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)					
1	I	1961.4.1	23-18	39°9	77°8	20	6.5	新疆巴楚	244°	63°	
	II	4.4	17-47	39°9	77°8		6.4		29°	216°	
	III	4.14	00-35	39°9	77°7	20	6.8		319°	136°	
2	I	1965.1.10	22-54	35°0	111°5		5.2	山西垣曲	133°	328°	
	II	1.13	0-18	35°1	111°6	10	5.5		84°	282°	
	III	1.15	23-26	35°1	111°6	10	5.1		12°	185°	
3	I	1966.3.1	0-51	(37°6)	(114°7)		4.0; 4.5	河北邢台	64°	357°	
	II	3.6	5-39	37°6	114°7		4.4; 5.2		180°	356°	
	III	3.8	5-29	37°4	114°9	10	6.8		125°	306°	
	IV	3.22	16-12	37°5	115°1		6.7; 7.2		111°	290°	
4	I	1969.12.17	16-00	18°5	110°6		5.1	广东海南岛	239°	55°	
	II	12.20	10-09	18°5	110°6		5.2		348°	164°	
5	I	1971.6.2	01-05	37°3	113°6		3.7; 4.3	山西和顺	162°	342°	
	II	6.2	12-13	(37°3)	(113°6)		3.1		105°	314°	
	III	6.5	14-37	37°4	113°7		3.8; 5.2		111°	299°	
6	I	1972.1.2	18-28	41°9	84°5		4.6	新疆轮台	125°	302°	
	II	4.5	21-20	42°3	84°4		4.6		37°	269°	
	III	4.9	12-11	42°3	84°8	30	5.6		22°	236°	
	IV	4.20	8-36	42°1	84°4		5.3		220°	210°	
7	I	1975.4.28	19-07	35°9	79°8		6.1	新疆和田	69°	250°	
	II	6.4	10-24	35°9	79°8	45	6.1		334°	193°	
8	I	1976.2.16	22-46	22°8	100°7	10	5.8	云南思茅	265°	85°	
	II	2.19	17-39	22°7	100°6	17	5.5		49°	247°	
9	I	1976.3.29	3-58	(38°2)	(120°9)		2.0	山东庙岛	147°	329°	用的丛集 开始时间
	II	3.29	16-18	(38°2)	(120°9)		2.4		142°	325°	
	III	3.29	23-27	38°2	120°9		3.5		9°	185°	
10	I	1976.11.7	2-04	27°6	101°1	21	6.7	云南宁蒗	28°	208°	
	II	12.13	14-37	27°4	101°0	21	6.4		251°	108°	

表 4 三种地震序列分组的统计参数 P_r 、 r 、 ϕ 和 $\Delta\phi$

类型	单发型		主发型		群发型		全部	
数目	26		95		10		131	
类别	剪	流	剪	流	剪	流	剪	流
P_r	3.6×10^{-6}	4.3×10^{-5}	6.8×10^{-9}	1.3×10^{-3}	4.1×10^{-2}	0.3	4.9×10^{-4}	6.7×10^{-2}
r	0.69	0.62	0.44	0.27	0.57	0.34	0.24	0.14
ϕ	67°	249°	300°	129°	198°	2°	317°	—
$\Delta\phi$	38°	46°	57°	67°	47°	62°	72°	—

注：“剪”表示潮汐最大剪应力，“流”表示潮汐流体静应力。

表 5 11 个晚期强余震的位相 ϕ_1 、 ϕ_2

编号	主 震				晚 期 强 余 震							地 点	备 注	
	地震时间 年.月.日时-分	震 源 位 置			震级	地震时间 年.月.日时-分	震源位置			震级	ϕ_1			ϕ_2
		$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)			$\varphi(N)$	$\lambda(E)$	h (公里)					
1	1947.3.17.16-20	33°3	99°5		7 $\frac{3}{4}$	1949.6.15.17-43	33°3	100°0		6.0	38°	211°	青海达日	参见文献[17]
2	1947.7.29.21-44	28°6	93°6		7 $\frac{3}{4}$	1951.4.15.7-41	28°4	93°8		6 $\frac{1}{2}$	209°	175°	西藏朗县	参见文献[17]
3	1966.3.22.16-20	37°5	115°0		7.2	1967.12.3.4-06	37°7	115°2	25	5.7	73°	256°	河北邢台	
						1968.1.16.3-34	37°8	115°2	20	5.3	77°	256°		
						1968.5.15.3-47	37°2	114°8	15	5.0	70°	250°		
4	1970.1.5.1-01	24°2	102°7	14	7.7	1976.10.9.14-12	24°1	102°6	24	5.3	26°	204°	云南通海	
5	1973.2.6.18-37	31°2	100°4	17	7.9	1973.9.9.10-14	31°7	99°8	32	5.8	327°	132°	四川炉霍	
6	1973.8.11.15-16	32°9	104°0		6.5	1974.11.17.0-26	32°9	104°0		5.7	313°	128°	四川南坪	
7	1974.5.11.3-25	28°2	104°1	8	7.1	1975.3.8.1-36	28°3	104°1		5.3	79°	235°	云南昭通	
8	1975.2.4.19-36	40°7	112°7	12	7.3	1978.5.18.20-33	40°7	122°7		6.0	356°	152°	辽宁海城	
9	1976.7.28.3-42	39°4	118°1	15	7.8	1980.2.7.13-32	39°4	118°0		5.3	290°	147°	河北唐山	
10	1976.8.16.22-07	32°8	104°3		7.2	1976.12.20.10-51	32°4	104°2		4.4	306°	125°	四川松潘	
11	1976.11.7.2-04	27°6	101°1		6.7	1978.8.31.11-26	27°5	101°0		5.4	345°	164°	云南宁蒗	
						1979.3.7.20-54	27°5	101°0		5.0	328°	142°		

用优势位相、位相平均变化范围和等效矢量模(见表4)把三种类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相分布简单地表示在图3(a),图3(b)是图3(a)对地震序列数目归一化之后的结果,它表示任意一个地震序列主震(对群发型指的是最后一个丛集的主震)的潮汐最大剪应力位相出现的可能性.对比图3(b)和图1(b)可以看到,当把地震的潮汐最大剪应力的位相按照地震序列的类型加以分类时,便出现了有意义的分布图象.这种分布表明主发型地震序列主震的潮汐最大剪应力的优势位相高于群发型地震序列最后一个丛集主震的优势位相.至于单发型地震序列主震的优势位相,正如文献[1]所指出,由于滞后效应,高位相的地震可能延滞到第一象限发生,因此应该认为单发型地震序列主震的优势位相实际上比主发型地震序列主震的优势位相高.诚然,滞后效应的讨论,目前还处在定性阶段,这里所提出的只是一种最可能的情况.关于滞后问题在文献[22]中有过比较明确的讨论.

3 前震和晚期强余震

在各种不同类型的地震序列中,晚期强余震的潮汐最大剪应力位相也有明显的优势分布(见表5和图4中的 $P_r = 1.9 \times 10^{-3}$,优势位相 $\phi_{2\text{晚余}} = 173^\circ$).由于晚期强余震的讨论主要限于大于和接近7级的地震,并且不是每个地震都一定有晚期强余震,因此所给出的数目也是有限的.

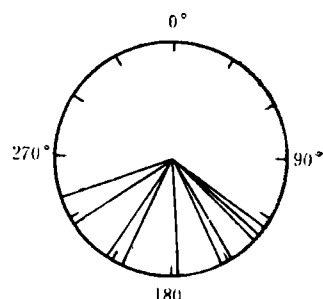


图4 各种序列晚期强余震的潮汐最大剪应力的位相分布.
 $P_r = 1.9 \times 10^{-3}$, $r = 0.75$,
 $\phi = 173^\circ$, $\Delta\phi = 36^\circ$

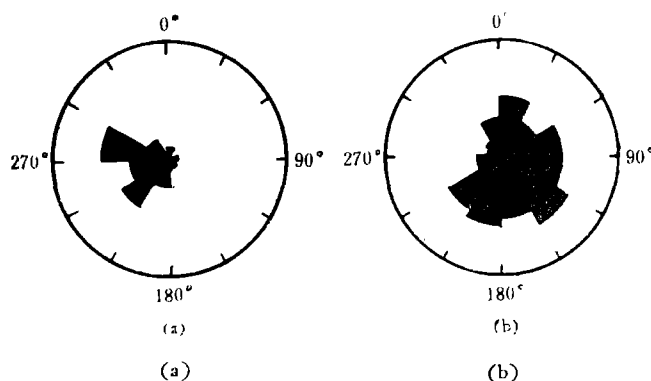


图5 单发型地震序列主震(a)和主发型地震序列主震(b)的潮汐流体静应力的位相分布

4 单发型地震序列和主发型地震序列,主震的潮汐流体静应力位相特点

单发型地震序列和主发型地震序列,其主震的潮汐流体静应力的位相,也具有一定的优势分布.图5(a、b)分别给出了这两种序列主震的潮汐流体静应力位相分布,对于单发型地震序列, $P_r = 4.3 \times 10^{-5}$,优势位相 $\phi_{1\text{单}} = 249^\circ$,对于主发型地震序列, $P_r = 1.3 \times 10^{-3}$,优势位相 $\phi_{1\text{主}} = 129^\circ$.

三、讨 论

在文献[1]中,曾经把固体潮最大剪应力的位相高低解释为由临震时应力积累速率的差异而造成的,即不同地震临震时应力积累的速度不同,因而其固体潮最大剪应力的位相也不相同,应力积累速率越高,潮汐最大剪应力的位相则越低。现在所得的结果进一步表明单发型地震序列的主震、主发型地震序列的主震以及群发型地震序列最后一个丛集的主震对潮汐最大剪应力的位相各自都存在明显的优势分布,这似说明对于同一种地震序列,其应力积累速率大体上是稳定的。而单发型地震序列主震的优势位相高于主发型地震序列主震的优势位相,并且后者又高于群发型地震序列最后一个丛集主震的优势位相,这就表明,平均而言,单发型地震序列的应力积累速率低于群发型地震序列的应力积累速率,而主发型地震序列的应力积累速率介于二者之间。主发型地震序列主震的潮汐最大剪应力位相的平均变化范围比单发型、群发型地震序列的大,表明主发型地震序列的应力积累速率的范围要大一些。这些结果与一些文献(如[3、10])中所叙述的结果是吻合的。因此,似乎可以认为,地震的潮汐最大剪应力位相的不同,反映了不同类型地震序列的应力积累速率之间的差异。这样,可否认为地震的潮汐最大剪应力的位相是地震时震源区地壳介质应力积累速率大小的一个反映。

这个观点还可以从地震观测的其它信息中得到验证。根据陈培善的资料和文献[18],可以粗略地估算出 1970 年 1 月 5 日云南通海 7.7 级地震前和 1976 年 11 月 7 日云南宁蒗 6.7 级地震前震源区地壳应力积累的平均速率,从而推求出潮汐最大剪应力的触发位相分别为 234° 和 239° , 这与表 2 和表 3 中给出的实际触发位相 237° 和 208° 基本符合。另外,从文献[19]可以求出反映应力积累速率增加的 b 值下降的平均速率,由表 6 可以看出, b 值下降速率越大(即应力积累速率越高),潮汐最大剪应力的触发位相越低,这种对应关系是很好的。尽管上述两方面的验证在定量关系上都是很粗略的,但至少定性上还是可信的。作者认为潮汐应力位相还与另外一些直接反映震源应力状态变化的力学量,如波速比也存在某种对应关系,取得更多资料建立定量关系,或许可能把潮汐应力位相用于实际的地震预报,这个问题将另文讨论。

表 6 部分地震的位相 ϕ_2 与 b 值下降平均速率对照

地 震			b 值下降平均速率 (月 $^{-1}$)	位 相 ϕ_2
时 间	震 级	地 点		
1976.5.29	7.3	云南龙陵	0.01	360°
1976.8.16	7.2	四川松潘	0.019	338°
1976.7.28	7.8	河北唐山	0.029	287°
1973.8.11	6.5	四川南坪	0.083	275°
1975.2.4	7.3	辽宁海城	0.087	213°
1974.5.11	7.1	云南永善大关	0.1	192°

基于上面的观点,不难理解由群发型地震序列的每个丛集的主震所组成的序列的位

相的依次下降趋势。这正反映了在岩石实验的加载(和重复加载)过程中应力速率的不断提高。至于晚期强余震,这时震源区可能处于这样一种情况:许多部分的应力积累速率已经逐渐恢复到正常的较低水平,并且从整个震源区来看,介质的平均塑性增加了。强余震可能是在未充分破裂的“空区”区域应力再次集中而发生的^[20]。另外,在主破裂发生之后,也可能在其附近的个别部分引起了应力集中的增强,这一部分的应力积累速率可能会是较高的。对前一种情况,潮汐最大剪应力的位相可能是以一百几十度为主,它反映了很低的应力积累速率和明显的塑性滞后,对于后一种情况,潮汐最大剪应力的位相大约为二百几十度,它反映了所谓“后效余震”的较高的应力积累速率,这两种情况的位相混合在一起,比较难以区分。这时地震类型的差异消失了,不同类型地震序列的晚期强余震的潮汐最大剪应力位相的明显优势分布,正是震源的上述状态的反映。对此,还需更多的资料加以深化,在理论上也需进一步研究。

研究不同类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相和潮汐流体静应力位相的组合特征有助于深刻认识潮汐应力对地震的触发作用。文献[1]曾经提到,围压对地震破裂的影响是有条件的,当按照地震序列的类型进行分组之后,可以看到对同一类型的地震序列,潮汐流体静应力的位相也出现了一定的优势分布。潮汐流体静应力的位相在 0° 到 180° 的范围,表示使围压增加,在 180° 到 360° 的范围,表示使围压减小。对主发型地震序列,主震的潮汐流体静应力优势位相 $\phi_{1\pm} = 129^{\circ}$,表示它的作用是增加围压;而对单发型地震序列,主震的优势位相 $\phi_{1\pm} = 249^{\circ}$,则表示潮汐流体静应力的作用是减小围压。因此,潮汐最大剪应力和潮汐流体静应力位相的组合特征表明,对主发型地震序列的主震,其触发条件是,潮汐最大剪应力的增加为偏应力相对应的介质应变能增加提供了贡献,潮汐流体静应力的作用增加围压也为介质的应变能的增加提供了贡献,二者作用相一致,与构造应力一起作用于震源介质上反映了一个加载过程,这与应力途径理论中的A型加载^[8,9]相类似。而对于单发型地震序列的主震,潮汐最大剪应力和潮汐流体静应力的作用使介质的应变能减小,但构造应力使介质的应变能增加,因此,共同的作用是一个既加载又卸载的过程,与应力途径理论中的B型加载^[8,9]相类似。在岩石声发射实验中,A型加载声发射出现早,次数多,水平高,类似于主发型地震序列,而B型加载声发射开始晚,次数少,水平低,类似于单发型地震序列。

最后,关于潮汐应力触发地震的机制还要作一点说明。傅承义教授曾经提出地震的“红肿”理论^[21],他指出当作用的体积很大时,日、月的作用可以产生足够的畸变。这就是说潮汐应力作用于“红肿”区上,可以在“爆发点”^[21]引起足够量级的应力集中。由于在震源孕育区的范围内,潮汐应力的位相基本上是相同的,因此这种应力集中的效应是会相当明显的。郭增建同志曾经估计过这种应力集中大约可以提高1—2个数量级^[22]。这样,潮汐应力触发地震的作用就比较容易理解了。

四、结 语

上述结果和讨论使我们认识到:(1)三种不同类型地震序列的主震(对群发型地震序列指的是最后一个丛集的主震)的潮汐最大剪应力的位相各自存在着明显的优势分布。

群发地震序列的每个丛集的主震的潮汐最大剪应力的位相依次呈降低趋势。这些特征并非是偶然的。(2) 不同类型地震序列的潮汐最大剪应力的位相与潮汐流体静应力位相的组合特征有较明确的物理意义,似与岩石力学实验中的 A、B 型加载的应力途径的实验结果有一定的对应关系。以上两点有助于进一步认识固体潮应力对地震的触发作用。

参 考 文 献

- [1] 高锡铭,殷志山,王威中等,固体潮应力张量对地震的触发作用,地震学报, **3**, 3, 1981.
- [2] K. Mogi, Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relation to the earthquake phenomena, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 1, 1962.
- [3] K. Mogi, Rock mechanics and earthquakes (manuscript), 1978.
- [4] C. H. Scholz, The frequency-magnitude relation of microfracture in rock and its relation to earthquakes, *B. S. S. A.* **58**, 1, 1968.
- [5] С. Д. Винограбов, К. М. Мирзоев, Н. Г. Саломов, Распределение во времени упругих импульсов возникающих при разрушении образцов, *изв. АН. СССР, Физка земли*, **4**, 1975.
- [6] 中国科学院地球物理所第三研究室实验组,单轴压力下岩石破裂的初步研究,地球物理学报, **19**, 4, 1976.
- [7] 陈颙,声发射技术在岩石力学研究中的应用,地球物理学报, **20**, 4, 1977.
- [8] 耿乃光等,应力途径和破裂前兆,地震学报, **2**, 3, 1980.
- [9] 陈颙,不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射,地震学报, **3**, 1, 1981.
- [10] 中国科学院地球物理所,地震序列的基本类型及其在地震预报中的应用,地震战线, **42**, 1971.
- [11] 周惠兰,地震震型判断方法探讨,西北地震学报, **2**, 2, 1980.
- [12] 中央地震工作小组办公室,中国地震目录,第一、二、三、四册,科学出版社, 1971.
- [13] 中国科学院地球物理所,中国地震台网观测报告, 1967—1977 年,地震出版社.
- [14] 国家地震局分析预报中心,全国地震目录, 1971—1980.6.
- [15] 吴开统等,海城地震序列特征,地球物理学报, **19**, 2, 1976.
- [16] 李钦祖等,唐山地震的震源机制,地震地质, **2**, 4, 1980.
- [17] 向宏发等, 1978 年海城 6.0 级地震的构造条件分析,地震地质, **2**, 2, 1980.
- [18] 卓钰如等,根据断裂力学观点推算 1976 年盐源地震的发展应力场,地震学报, **1**, 1, 1979.
- [19] 李全林等, b 值时空扫描,地球物理学报, **21**, 2, 1978.
- [20] 傅征祥, 1978 年 5 月 18 日海城 6 级地震前地震活动的某些特征,地震学报, **3**, 2, 1981.
- [21] 傅承义,关于地震发生的几点认识,地震战线, **43**, 1971.
- [22] 郭增建等,震源物理,地震出版社, 1979.

ON THE CHARACTERISTICS OF THE PHASE OF SOLID TIDAL STRESS FOR DIFFERENT TYPES OF EARTH- QUAKE SEQUENCES OCCURRED IN THE CONTINENT OF CHINA

GAO XIMING WANG WEIZHONG

(Institute of Seismology, State Seismological Bureau, Wuhan, China)

Abstract

In this paper, the characteristics of phase distribution of solid tidal stress for 131 strong earthquake sequences occurred in the continent of China have been studied.

The results obtained about the maximum tidal shear stress are as follows: there is an apparent optimal distribution of phase of the main shock for the earthquake sequence of the single-shock type and main-shock type, but the optimal phase of the main shock of the single-shock type is significantly higher than that of the main-shock type; in the earthquake sequence of the swarm-shock type, it is easily observed that some apparent clusters can be distinguished, and the phases of the sequence which consists of the main earthquake in each cluster tend to decrease orderly; the phase of late strong aftershocks of various types of earthquake sequences are also of optimal distribution.

The composite characteristics of the phases of the maximum tidal shear stress and tidal hydrostatic stress of different earthquake sequences have definite physical significance, which is also an intended effect of the stress path of A type and B type loading processes in rock acoustic emission experiments in our problem.