

地震震型判断方法探讨

周惠兰 房桂荣 章爱娣 李用甫 柯龙生 杜月华

(中国科技大学)

一、前言

在构造应力作用下,在地壳或上地幔某些部位逐渐积累起应变和应变能。当这种应变在某处达到岩石破裂的临界应变值或当应力达到岩石的破裂强度时,岩石就破裂而发生地震,释放了应变能。所积累起的应变能不是通过一个地震而是通过一系列地震释放完毕。这一系列地震在时间上是很靠近的,在地点上同处于一个震源体内,称为一个地震序列。

在地震序列中往往有一个大震,震源体内的应变能主要由它释放出来。在其之前的部分称为前震序列,在其之后的部分称为余震序列。整个地震序列反映了震源体由发生小破裂到发生大破裂然后逐渐破裂平息的全过程。从该大震在整个地震序列中的重要程度出发,人们把地震序列分为三类:

孤立型—在整个序列中有一个震级特别突出的大震,称为主震,主震之前的前震和之后的余震序列的能量与主震本身相比是微不足道的。前震和余震的个数少而且震级小。

震群型—在整个序列中有两个以上的比较突出的大震,这几个大震的震级相近。前震和余震一般都是比较多而且震级较大。

主震型—介于以上两种类型之间,有一个突出的主震,但一般其前震余震序列比孤立型发育,却不如震群型的发育。

茂木清夫^[1]曾经对均匀程度不同的岩石以不同的方式加压力,观测岩石大破裂之前的微破裂分布情况。按照这些微破裂的多少也可以把破裂序列分成以上三种类型。他认为引起地震的构造应力的作用方式大致是相同的,不同的序列类型主要取决于岩石的均匀程度。特别均一的岩石条件将导致发生孤立型地震,特别不均一的岩石条件将导致震群型地震,而主震型序列的介质均一程度介于以上两种极端情况之间。陈颙等人^[2]的单轴重复加压岩石破裂实验表明,岩石的受力历史也会影响岩石大破裂之前的微裂数目,从而也可能影响震型。Nur^[3]、蜀水^[4],等人认为震源区水的扩散过程及水的饱和程度是否均匀也与震型有关。饱和得极不均匀,可能产生震群型;饱和得均匀,可能成孤立型。介于两者之间则为主震型。对于主震之后的余震的发生机制,人们也从其它方面进行了研究。贝尼奥夫^[5]在1951年提出余震是由断层岩石蠕动所引起的看法。Knopoff在1972年^[6]曾在地震发生的“最近邻模型”的基础上探讨余震序列特征,大塚道男^[7]则提出用围棋(基石)浸透模型来解释余震序列。近来,人们又引进流变学和断裂力学中的一些理论来对余震序列作研究,如我国谷继

成等人所作的工作〔8〕。可以看到,地震序列的实验模拟,统计分析,理论研究,将给出有关地壳岩石破裂全过程的信息,这是地震成因,震源物理研究工作的一部分,与地震预报工作也有密切关系。

从75年以来我们对我国大陆上1960年以来的主要地震序列的统计特征做了一些工作。本文从研究地震序列的能量和余震空间分布范围的特征入手,探讨在某地发生一个强震之后正确判断震型的方法。人们都知道,正确地判断震型对于正确地掌握强震之后的地震总趋势,对于抗震救灾,安定民心恢复生产,是非常重要的。文中提出的方法的基本思想是在1975年提出的,并用它们对1975年以来的一些大震序列作了外推判断。

二、震型划分

关于震型划分的依据,已有人做了一定工作〔9〕。我们对我国1960年以来51个地震序列的研究(表一)表明,划分震型可按以下几个原则进行:

1. 用全序列(包括前震序列)中的最大地震 M_{max} 所释放的地震波能量 E_{max} 与全序列的总地震波能量 $E_{总}$ 的比值(表一中第七栏)来划分震型。

$E_{max}/E_{总} \geq 99.9\%$ 者,为孤立型。例如表一中的地震序列№1—№7。

$E_{max}/E_{总} \leq 80\%$ 者,为震群型,如表一中的地震序列№39—№51。

$90^\circ \leq E_{max}/E_{总} < 99.9\%$ 者,为主震型,如№8—№38。

在计算地震波能量时,使用的是古登堡—里克特震级能量公式:

$$\lg E (\text{焦耳}) = 4.8 + 1.5M_s \quad (1)$$

2. 计算序列中第一个强震 M_1 的能量 E_1 (对于主震型或孤立型,序列中的第一个强震也就是主震或最大地震 M_{max} ,因此 $E_1 = E_{max}$ 。但是对于震群型序列,第一个强震 M_1 并不一定是最大的。例如,1966、3、8邢台地震序列,第一个强震震级是6.8,而3月22日又发生一个7.2级大震,这时 $M_1 \neq M_{max}$, $M_1 \neq E_{max}$);然后计算从它之后的余震序列的能量 $E_{余}$ (在上述邢台地震序列中,7.2级就看成是6.8级地震的余震)。求比值 $E_{余}/E_1$ 列于表一第八栏。可知

$E_{余}/E_1 \leq 0.1\%$ 者,为孤立型; $E_{余}/E_1 \geq 30\%$ 者,为震群型; $0.1\% < E_{余}/E_1 < 10\%$ 者,为主要震型。

3. 把序列中的第一个强震 M_1 与其后的最大余震震级的差值记作 $\Delta M_{余}$,列于表一中第十六栏,得到

$\Delta M_{余} \geq 2.4$ 者,为孤立型; $1 \leq \Delta M_{余} < 0.6$ 者,为震群型; $0.6 < \Delta M_{余} < 2.4$ 者,为主震型

按以上三个原来则划分51个地震序列,基本上是一致的。只有一个例外,即1974、6、15四川甘孜5.2级地震序列,按其 $E_{max}/E_{总} = 99.8\%$ 应划为主震型,而按其 $\Delta M_{余} = 2.6$, $E_{余}/E_1 = 0.04$,应划为孤立型。我们暂且仍把它归入主震型。

三种震型的比例是:孤立型7个,占13.7%;震群型12个,占23.5%;主震型32个,占62.8%。

在同一序列类型中,序列仍具有多样性。例如,虽然同属于主震型,但1975年、2月4日海城地震具有丰富的直接前震序列,而1976、7、27唐山地震却几乎没有直接前震。又例如,

1966、3、8邢台地震和1971、3乌什地震同属于震群型序列，前者具有丰富的余震活动，而后者余震活动却不大丰富，类似于主震型的余震活动。再比如，1971、8、16马边地震，1976、5、29、龙陵地震，1976、8、16松潘地震都是震群型，前两者却有较多的直接前震活动，而后者却几乎没有直接前震。总之，情况还是相当复杂的。也许随着观测资料的积累和研究工作的进展，可以把震型再作细分。

从表一可以看到一个现象，即没有 $E_{m,x}/E_{\Sigma}$ 总落在80%~90%之间的序列。但后来唐山地震序列的 $E_{m,x}/E_{\Sigma} = 85\%$ 。现在我们把它仍归入主震型。毕竟落入该范围的序列是极少的，从震群型到主震在 $E_{m,x}/E_{\Sigma}$ 上表现出有一间隔。因此，在以上三个划分原则中，似乎 $E_{m,x}/E_{\Sigma}$ 更为重要些

三、地震序列的空间展布范围

1. 余震分布区的长轴

取直接前震、主震、余震震中分布图上震中分布面积，简称为余震面积。该分布面积基本上呈椭圆形。量取长轴 L ，列于表一中第十栏。发现 L 与震型无明显关系，但随序列的最大震级 $M_{m,x}$ 增加而增加，其规律是。

$$\lg L = (0.31 \pm 0.03) M_{m,x} - 0.40, (4.5 \leq M_{m,x} \leq 7.9, L \text{—公里}) \quad (2)$$

图1表示了公式(2)的拟合情况以及其它人的一些资料。可以看到，与用波谱方法得到的主震破裂长度^[10]（图中X号）相比， L 整个偏大，这也合理。与冯德益等人^[11]的公式

$$M = 3.4 \lg L^{\circ} + 1.4$$

相比，两条直线近乎平行，但 L° 整个比偏大很多。这也是合理的，因为 L 是由波速异常范围得到的孕震区的长轴，而 L° 是直接发震的震源区的长轴。

2. 余震面积的长轴之比

长轴 L 与短轴 W 之比列于表一中第十一栏。 L/W 与震型无关。但当 $7 \leq M_{m,x} < 8$ 时， L/W 的平均值为2.0；当 $6 \leq M_{m,x} < 7$ 时， L/W 平均值为1.8；当 $5 \leq M_{m,x} < 6$ 时，该均值为1.6。可见， L/W 随序列的最大震级的加大而略有增加，即地震愈大时，余震区更显得狭长些。

3. 余震区面积 S

$S = \pi \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{W}{2}$ 计算余震面积，列于第十二栏。 S 与震型无明显关系，而和 $M_{m,x}$ 有统计关系（图2）：

$$\begin{aligned} \lg S &= (0.62 \pm 0.03) M_{m,x} - 1.09 \\ (4.5 \leq M_{m,x} \leq 7.9, \quad S \text{—公里}^2) \end{aligned} \quad (3)$$

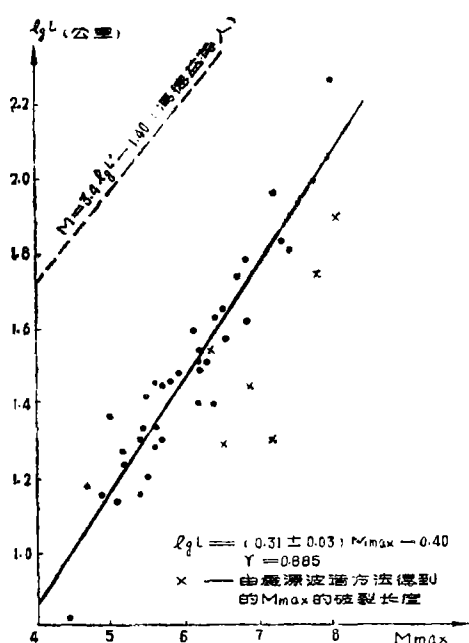


图 一

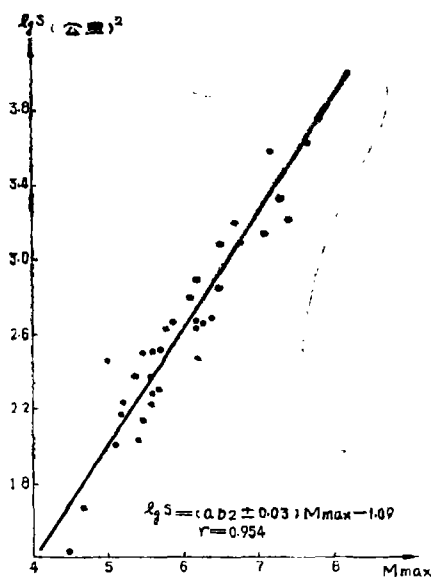


图 二

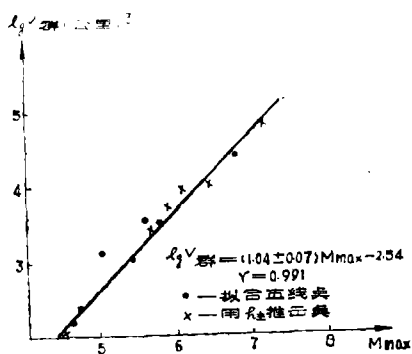


图 三

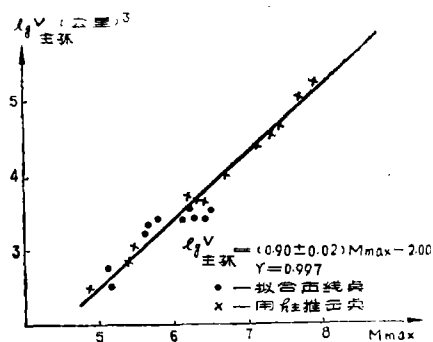


图 四

4. 余震区体积 V

在以余震区长轴作的前震、主震、余震震中剖面图上量取展布宽度 Z ，由公式 $V = \frac{4}{3} \pi \cdot$

$\frac{Z}{2} \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{W}{2}$ 计算震源区体积，列于表一第十四栏。

V与震型有明显关系。V与 $M_{\max}$ 的关系(为图3图4):

$$\lg V_{\text{群}} = (1.04 \pm 0.07) M_{\max} - 2.54 \quad (4)$$

$$(4.5 \leq M \leq 7.2, \quad V - \text{公里}^2)$$

$$\lg V_{\text{主、孤}} = (0.90 \pm 0.02) M_{\max} - 2.0 \quad (5)$$

$$(4.9 \leq M \leq 7.9, \quad V - \text{公里}^3)$$

由上两式得到

$$\lg \frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 0.14 M_{\max} - 0.54$$

可见当

$$M_{\max} = 3.9 \text{ 时}$$

$$\frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 1$$

$$M_{\max} = 5$$

$$\frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 1.5$$

$$M_{\max} = 6$$

$$\frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 2.0$$

$$M_{\max} = 7$$

$$\frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 2.8$$

$$M_{\max} = 8$$

$$\frac{V_{\text{群}}}{V_{\text{主、孤}}} = 3.8$$

即当序列最大震级 $M_{\max}$ 为4~5级时,震群型和主震、孤立型的震源体积几乎一样大。但当 $M_{\max} = 8$ 时,震群型的震源体积却大约是主震型、孤立型的4倍,差别是很大的。

有不少序列给出深度的余震极少,无法求得Z值,因而不能直接得到V。对这部分地震序列用了一个间接方法求出V值。先用资料完整的17个序列按上述方法直接得到其V值,再找到序列中最大地震 $M_{\max}$ 的深度h与V的比值 $\frac{V}{h}$,得到 $\frac{V}{h}$ 与 $M_{\max}$ 的关系(图5、6):

(V—公里³)

$$\lg \frac{V}{h} = (0.97 \pm 0.08) M_{\max} - 3.21 \quad (6) \quad (\text{震群型})$$

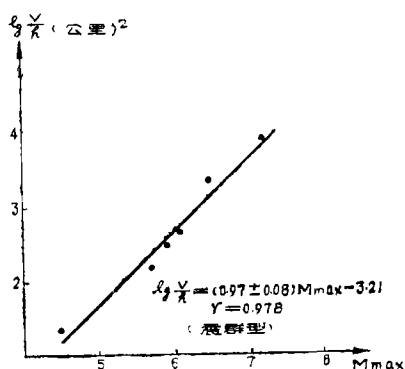


图 五

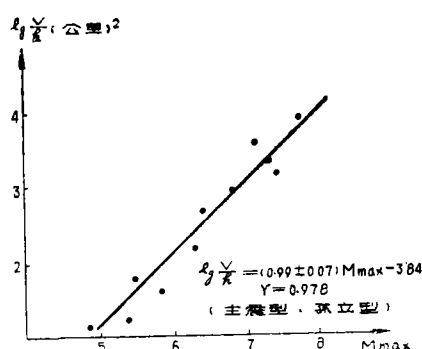


图 六

$$\lg \frac{V}{h} (0.99 \pm 0.07) M_{\max} - 3.84 \quad (7) \quad (\text{主震型、孤立型})$$

然后对那些只给出 $M_{\max}$ 的深度 h 的序列, 就用以上两式估算出震源体积 V , 并在第十四栏中以 $[V]$ 算出。对于那些连 $M_{\max}$ 的深度也未给出的序列, 则无法给出 V 值。

由 (6) (7) 式知, 震源体积 V 随序列中最大震级的深度 h 的增大而增大。但这仅适用于我国浅源地震 (20 公里之内)。对于更大的深度变化范围是不成立的。

按 (6)、(7) 式估算出的震源体积用 “ $\times$ ” 号点在图 3 图 4 中。这些资料点与前述直接得到的震源体积 V 的资料点以及直线 (4)、(5) 式都相符得较好。可见, 按 (6)、(7) 间接估算震源体积是可行的。

5. 断层面积

对于有些已经由 P 波初动解或其它办法给出断层面倾角 θ 的地震, 用公式

$$A = L \frac{Z}{\sin \theta}$$

估算出地震断层面积 A , 列于表一第 13 栏。其中带括号者不可靠。这样得到的断层面积, 估计应比由震源机制给出的单个主震的断层面积略大些。 A 与序列最大震级 $M_{\max}$ 的关系为 (图 7) :

$$\begin{aligned} \lg A &= (0.59 \pm 0.03) M_{\max} - 0.98 \\ (4.5 \leq M \leq 7.9, A - \text{公里}^2) \end{aligned} \quad (8)$$

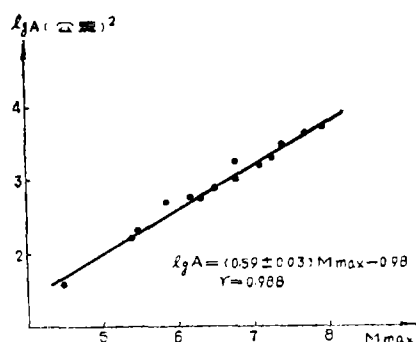


图 七

表一

No	年月日	地 点	h Km	M ₁	M _{max}	E _{max} /E _总 %	E _余 / E ₁ %	E _余 / E _总 %	L (Km)	L/W	S(Km ²)	A(Km ²)	V(Km ³)	ΔM 前	ΔM 余
1	69.7.26	广东阳江	10		6.4	99.95	0.04	0.04	25	1.9	490	(325)	4260	3.6	2.6
2	71.9.14	云南普洱	(33)		6.2	99.98	0.009	0.009	25	2.0	290			3.1	3.0
3	74.4.22	江苏溧阳	18		5.5	99.93	0.06	0.06	16	1.5	138	189	1010		2.4
4	70.7.31	四川雷、西	44		5.4	99.91	0.09	0.09	14	1.8	110	148	730	3.8	2.4
5	74.9.29	新疆阿合奇			5.4	99.93	0.04	0.04	20	1.8	108			2.5	2.6
6	72.4.8	四川康定	15		5.2	99.98	0.013	0.013	18	1.7	177		(330)		2.7
7	67.8.20	陕西南郑			5.0	99.98	0.018	0.018							2.5
8	73.2.6	四川甘孜	17		7.9	99.82	0.18	0.18	176	2.7	9120	4580	158000		1.9
9	70.1.5	云南通海	13		7.7	99.26	0.75	0.74	79	1.9	4040	3740	99800	3.5	1.8
10	69.7.18	渤海	30		7.4	99.87	0.13	0.13	65	2.0	1630	2640	43500	4.1	2.3
11	75.2.4	辽宁海城	18		7.3	99.24	0.75	0.74	67	2.0	2100	1470	36400	2.7	1.8
12	74.5.11	云南昭通	7		7.1	98.92	1.75	1.70	46	1.6	1360	1330	25400	3.3	1.4
13	67.8.30	四川甘孜	8		6.8	93.59	6.43	6.03	42	1.5	1190	880	14300	2.6	0.8
14	62.5.21	青海霍布逊湖	25		6.8	94.35	1.68	1.66	62	2.1	1310	(930)	13100		1.4
15	71.4.28	云南普洱	15		6.7	97.74	0.33	0.33	55	1.3		1550	10210	1.6	1.7
16	73.8.11	四川南坪	8		6.5	98.93	0.31	0.31	37	1.8	700		(3450)	1.4	1.6
17	62.3.19	广东河源	5		6.4	95.70	3.95	3.78						2.0	1.1
18	66.9.28	云南中甸	8		6.4	99.31	0.70	0.69	43	2.0			(2750)	3.4	1.9
19	67.3.27	河北河间	30		6.3	99.80	0.20	0.20	32	1.8	450	528	4340	4.8	1.9
20	73.8.16	云南普洱	10		6.3	96.84	2.84	2.75					(2740)		1.1
21	70.2.24	四川大邑	15		6.2	99.36	0.59	0.59	35	1.9	770	1030	(3270)	2.8	1.5
22	72.1.16	新疆柯坪			6.2	66.69	0.31	0.31	32	2.3	470	544	4670		1.7
23	75.1.15	四川康定			6.2	99.06	0.95	0.94	31	1.6	440			2.8	1.4
24	65.7.3	云南江城	15		6.1	97.18	2.90	2.82	(49)	(3.3)	(580)		2600		
25	71.2.5	云南保山	30		5.8	98.78	1.24	1.22	29	1.6	430		(2620)		1.3
26	61.7.26	新疆西克尔	33		5.7	96.98	3.11	3.01	28	1.8	330	(700)	(2300)		1.1
27	22.1.23	云南红河			5.6	98.56	1.45	1.43	22	1.8	190				1.4
28	74.11.17	四川南坪			5.6	99.43	0.49	0.49	22		173			2.1	1.7
29	75.1.12	云南双柏			5.6	99.88	0.12	0.12	19		240			2.7	2.3
30	74.1.16	四川南坪			5.5	98.59	1.03	1.01	26	1.6	330			1.4	1.4
31	70.9.5	四川壤塘	20		5.5	99.35	0.65	0.64					(880)		1.5
32	70.11.8	四川壤塘	(50)		5.5	98.87	1.14	1.13							
33	74.6.15	四川甘孜			5.2	99.80	0.04	0.04	17		147			2.0	2.6
34	71.6.28	宁夏吴忠	33		5.1	93.06	2.66	2.47	14	2.3	100		(580)	1.0	1.2
35	68.3.16	云南南华	13		5.1	97.94	1.29	1.26	(19)	1.4	(78)			1.4	1.4
36	75.1.14	乌鲁木齐			0.5	99.79	0.21	0.21	(11)	(1.6)	(52)			3.1	2.0
37	74.6.6	河北宁晋	22		4.9	94.76	5.40	5.11	14	1.7	88	(70)	290	1.9	0.9
38	75.3.16	四川康定			4.7	98.35	1.68	1.66	15	1.7	17			2.2	1.4
39	66.3.8	河北邢台	10		7.2	65.52	506.7	83.4	29	1.8	3680		73600	1.6	0.4
40	66.2.5	云南东川	5	6.8	6.5	72.35	38.2	27.7	45	1.7	1170	1620	10800	3.3	0.3
41	71.3.23	新疆乌什	20		6.1	40.88	246	71.1	39		620	650	8570		-0.1
42	71.8.16	四川马边	17	6.0	5.9	44.37	125	55.6	30	1.4	470	(820)	5020	1.3	0.2
43	71.6.16	新疆乌什	12		5.8	51.26	136.7	88.3	30		(350)	483	(3200)		-0.6
44	72.9.27	四川康定	18	5.2	5.7	40.94	244	70.9	20	1.4	200		2560		-0.1
45	72.4.9	新疆轮台	20	5.6	5.6	62.14	57.8	35.9	28	2.4	330	(400)	(3410)	1.0	0.3

续表一

No	年月日	地点	h Km	M ₁	M _{max}	E _{max} / E _总 %	E _余 / E ₁ %	E _余 / E _总 %	L (km)	L/W	S (Km ²)	A (Km ²)	V (Km ³)	ΔM _前	ΔM _余
46	65.1.13	山西恒曲	10		5.5	71.26	40.3	28.7					[1360]		0.4
47	73.6.29	四川马边	10	4.8	5.4	51.42	143.5	92.8	20	1.3	240		[1090]	1.3	-0.6
48	69.12.17	广东琼东海	24	5.1	5.2	56.92	148	59.7							-0.1
49	73.6.1	云南腾冲	30	4.9	5.0	54.47	160	61.6	23	1.2	290		[1340]	2.9	-0.1
50	71.6.5	山西和顺	10	4.3	4.7	63.84	400	64.2						0.4	-0.4
51	73.3.11	安徽霍山	5	4.3	4.5	62.90	214	67.5					[1360]	1.4	-0.2

四、地震震型判断方法探讨

如前所述,震型的起因是个复杂问题,直今不大清楚,因此要准确地预报和判断震型是有困难的。但是我们可以从以往发生了的地震序列的统计特征中,来尝试寻找判断震型的某些途径。

1. 根据一地区历史地震的震型来作推测

在某些地区,地震活动时其序列类型往往是不变的。例如四川马边地区,地震往往以震群型出现:1971、8有5.9级震群活动,1974、1有5.4级震群活动。又比如新疆乌什地区往往发生双震型的震群活动:1971、3有6.1级震群,1971、6有5.8级震群。而在另一些地区则主要是主震型活动,例如四川南坪附近,1973、8有6.5级主震型序列,后又有1974、1月5.5级和1974、11月5.6级主震型序列。因此,如果所监视地区的历史地震常常具有某种型式,那么就可以作为在该地区发生一个强震时判断其震型的一个依据。

当然,地震现象是非常复杂的。有些地区是各种震型都发生过。例如,四川康定九龙一带,1972、4曾发生5.4级孤立型地震,1972、9却发生过5.7级震群活动,到1975、1有6.2级主震型地震。对这些地区则难以简单地以过去的震型来判断正在发生中的序列。

2. 根据ΔM_前推算ΔM_余来预报震型

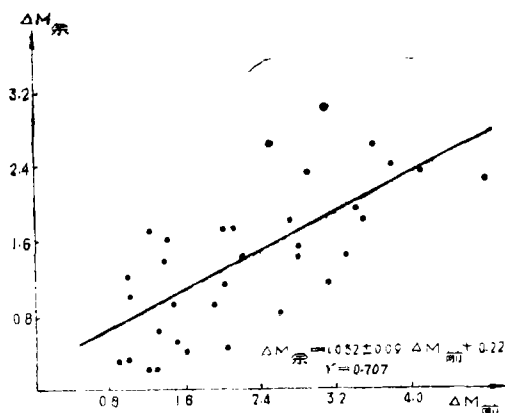
一个序列中的第一个强震 M₁ 与其之前的最大前震震级之差记作 ΔM_前, 列于表一中第十五栏。由 ΔM_前 和 ΔM_余 资料, 得到它们之间的统计关系为 (图 8):

$$|\Delta M_{余}| = (0.52 \pm 0.09) \Delta M_{前} + 0.22$$

(9)

图 八

可见,一般来说,ΔM_前愈大,|ΔM_余|也愈大。而前面已经提到,|ΔM_余|的大小是判断地震震型的重要依据。因此,当一个强震 M₁ 发生时,就可以用它与其最大前震震级之差 ΔM_前 由 (9) 式估算出 ΔM_余, 再依据 ΔM_余



予报震型。

表二是对表一中给出 $\Delta M_{前}$ 和 $\Delta M_{余}$ 的序列用(9)式来予报震型的内符检验,并对后面5个序列作了外推予报检验。检验步骤和原则是:

①由 $\Delta M_{前}$ 按(9)式算出 $|\Delta M_{余}|$

②当 $\Delta M_{余} \geq 2.4$ 时,报孤立型

当 $0.6 < \Delta M_{余} < 2.4$ 时,报主震型

③与序列的实际震型相比较,报对的以“V”表示,报错了的以“X”表示。

内符检验结果是:32个序列中震型报对的有19个,报错的13个。其中震群型7个,全部报错;孤立型4个,全部报错;主震型21个,报对19个,报错2个。

外推检验结果是:5个序列中,震型报对2个,报错3个。其中3个震群型,全部报错;2个主震型,全部报对了。

由此可见,用这个方法予报主震型还比较成功,而予报孤立型和震群型是失败的。

考虑到实际工作中,从抗震防震角度来看,孤立型和主震型差别不大,如果把主震型报成孤立型或把孤立型报成主震型都不算错的话,则在内符检验时成功率可以提高,但其中震群型仍全部报错。可见这个方法不能报出震群型。此外,对于无明显前震活动的唐山序列和松潘序列,也无能为力。

3. 用强震后两天内的余震能量判断震型

在统计强震 M_1 发生后余震在一天、二天、十天内发生的个数时,发现较大余震有75%都发生在强震后的二天内,即余震大部分能量在主震后的两天内释放了。可见强震后两天内的余震能量大致反映了余震序列的特征。前面已经述及,强震 M_1 和其后的余震能量之比基本上可以判断震型。如果能用两天内余震能量与 M_1 的能量之比来判断震型,则对分析今后地震趋势是有意义的。为此,对资料比较可靠的35个序列,计算了强震 M_1 之后两天内与其震级差 ≤ 3.5 的余震能量 E_2 ,求出比值 E_2/E_1 ,列于表三。发现,对于绝大多数序列来说, E_2/E_1 的值能反映出震型来。得出的规律是,当 $E_2/E_1 > 1.0\%$ 时,序列为震群型,当 $E_2/E_1 < 1.0\%$ 时,序列为主型。主型在这儿是主震型和孤立型的合称,由于前面已经叙述过的理由,我们在这儿不再把它们看成是两种类型。

现在按此原则来对35个序列作震型判断的内符检验和后来发生的一些序列作外推检验。检验的步骤和原则是:

①计算比值 E_2/E_1

②若 $E_2/E_1 < 1.0\%$,则判断序列为主型。曾由27个主型序列得出的最大震级 $M_{m,x}$ 与最大余震震级 $M_{余m,x}$ 之间的经验关系式

$$M_{余m,x} = (0.97 \pm 0.07) M_{m,x} - 1.25 \quad (10)$$

以 M_1 值代入此式,算出 $M_{余m,x}$ 以此予报今后的余震震级的上限 $\tilde{M}_m$ 。

③若 $E_2/E_1 > 1.0\%$,则判断序列为震群型。而今后要发生的最大震级须分两种情况来予测:

如果 $E_2/E_1 > 100\%$,则表明在强震 M_1 后两天内已经发生了与 M_1 大小相仿的强震,震群型实际上已经表现了出来。这时两天后的最大余震震级将以两天内已发生的最大震级

M_{max} 与0.6的差值为上限。

如果 $1\% < E_2/E_1 < 100\%$, 则强震后两天内尚未发生与该强震相仿的大震, 那么今后将发生这个大震, 而其震级是在 $M_1 - 0.6 \sim M_1 + 0.6$ 之间。

④与序列的实际震型相比较, 对的用表三最后一栏中上方的“V”号表示, 错者记以“X”。

⑤将 $\tilde{M}_m$ 与两天后的余震序列中实际发生的最大震级 M_m 相比较, 偏差不大于0.5级的即认为报对, 以最后一栏下方的“V”号表示, 错者记以“X”。

内存检验结果

35个序列, 震型报对30个, 报错5个。其中主型26个, 报对22个, 错4个; 震群型9个, 报对8个, 错1个。而且, 凡是震型报对的, $\tilde{M}_m$ 也都报对了; 凡是震型报错的, $\tilde{M}_m$ 也都报错了。

外推检验结果

3个序列, 其中1个主型序列, 判断错了, 而二个震群型序列当中, 对的1个。

4. 用强震后5天内的余震展布体积来判断震型

从表一中选出了14个资料可靠的地震序列的震源体积 V 和全序列释放的地震波总能量 $E_{总}$ 。取 $\alpha = E_{总}/V$ 为单位体积内所释放的平均地震波能量, 即平均能量密度 α , 列于表四。发现 $Lg\alpha$ 和序列的最大震级 M_{max} 有很好的线性关系:

$$Lg\alpha = 7.016 + (0.565 \pm 0.009) M_{max} \quad (11)$$

$$(5.5 \leq M_{max} \leq 7.9, \alpha - \text{焦耳/公里}^3)$$

由图9可见, α 与震型无关。表四和(11)式表明, 当 M_{max} 由5.5变到7.9时, 不仅震源体积 V 在增大, 而且单位震源体积释放地震波能量也在增加。假设大地震序列和山地震序列的震源体释放的应变能 W 转换成地震波能量 $E_{总}$ 的效率 η 相同, 由

$$E_{总} = \eta W = \eta \cdot \frac{1}{2} \mu \varepsilon^2 V$$

知

$$\alpha = \eta \cdot \frac{1}{2} \mu \varepsilon^2 = \eta \cdot \frac{1}{2} \frac{\tau^2}{\mu}$$

式中 μ 为岩石剪切模量, ε 为平均临界应变, τ 为岩石破裂强度。那么, α 随 M_{max} 而增大就反映了震源体内岩石临界应变 ε 和破裂强度 τ 随 M_{max} 而有增大。这是可能的。因为通常认为只有在那些岩石破裂强度大的地方才能积累起大的应变能产生大地震。

另一方面, 由强震 M_1 后五天内的余震可以计算出已释放的地震波能量 E_5 , 并可以找出一个余震体积分 V_5 。由资料得到总体积 V 与 V_5 的关系 $V = V_5 /$

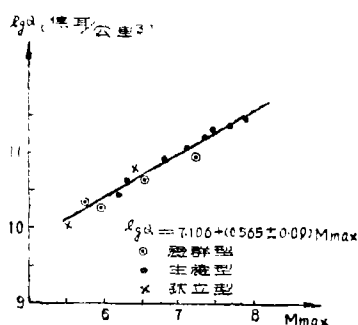


图 九

0.84。由此可估算出总体积 $\tilde{V}$, 而由(11)式可以算得与 M_1 相应的平均密度 α , 于是可算得

总地震波能量 $\tilde{E}_{\text{总}} = \alpha \tilde{V}$ 。研究 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}}$ 对震型的关系, 发现对于主型序列 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}} \geq 0.9$; 而对于震群型序列, $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}} < 0.6$ 。现按此原则对原14个序列中能划出 V_5 的13个序列作内符检验, 并对5个序列作外推判断检验。

检验的步骤和原则是:

①用强震 M_1 和其后5天内发生的余震资料划出震源体积 V_5 。

②用公式(1)求出5天内释放的地震波能量(包括强震 M_1) E_5 。

③用5天内发生的最大震级 $M_{5\text{max}}$ (有些震群型序列的 $M_{5\text{max}}$ 大于 M_1 ; 对于主型地震序列来说, M_1 就是 $M_{5\text{max}}$), 代入(11)式算出 α 。

④用 $\tilde{V} = V_5 / 0.84$ 估算出震源总体积 V 。算出总地震波能量 $\tilde{E}_{\text{总}} = \alpha \tilde{V}$ 。

⑤计算 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}}$, 并判断震型:

若 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}} \geq 0.9$, 且5天内没有发生与 M_1 相仿的大地震, 则判断该序列为主型地震。然后以(10)式估算今后余震震级上限。

若 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}} \geq 0.9$, 但5天内已经发生了与 M_1 震级相仿的大震, 则判为震群型, 今后余震震级的上限是 $(M_{5\text{max}} - 0.6)$ 。

若 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}} \leq 0.6$, 则判断为震群型。然后计算 $\tilde{E}_{\text{总}}$ 与 E_5 的差值 ΔE , 代入(1)式求出今后将要发生的大震的震级。

⑥将判断震型与实际震型作对比, 相符者以“V”表示, 否则以“X”表示。将所予报的今后震级上限或大震震级与实际情况相比较, 偏差不超过0.5级的算是报对, 否则算错报。

内符检验结果

13个序列的震型和5天后的活动趋势全部与实际相符。

外推检验结果

5个序列的震型和5天后的活动趋势, 全部报对。这里面包括近年来的唐山、龙陵、松潘三个大序列。

但是, 由于很多情况下是强震发生之后才架台观测, 5天之内的地震目录给不全, 就是给出的目录中也很少给出震源深度。这既使得不能更广泛地研究 V_5 与 $V_{\text{总}}$ 的关系以使 $E_5 / \tilde{E}_{\text{总}}$ 对震型的依赖关系弄得更为确切些, 也使得不能就现在得到的依赖关系应用到更多的序列上来进行检验。因此, 还不能说这个方法真有这样好的震型判断效果。

五、结 语

震型判断或预报的途径, 是一个有实际意义的问题。这里仅在分析地震序列的能量和空间展布范围简单统计关系的基础上提出了一些试验方法。由于第二个方法只用了强震以及最大前震, 而且得到(9)式的资料点比较分散, 要推断震型自然困难, 虽然对主型序列有较好的推判效果, 但无法报出震群型。第3个方法使用了强震之后二天内的资料, 判断震型的成功率就提高了。而第4个方法使用了5天资料, 自然更会好些。有些方法曾在地震现场使用过, 但毕竟实践太少, 有待今后再作检验修正。

表二

表一中 的序号	强震 M ₁	ΔM 前	ΔM 余 予报值	予报 震型	ΔM 余 实际值	实际 震型	检 验	备 注	表一中 的序号	强震 M ₁	ΔM 前	ΔM 余 予报值	予报 震型	ΔM 余 实际值	实际 震型	检 验	备 注
1	6.4	3.6	2.1	主震型	2.6	孤立型	×(√)		30	5.5	1.4	1.0	主震型	1.4	主震型	√	
2	6.2	3.1	1.8	"	3.0	"	×(√)		33	5.2	2.0	1.3	"	2.6	"	√	
4	5.4	3.8	2.2	"	2.4	"	×(√)		34	5.1	1.0	0.7	"	1.2	"	√	
5	5.4	2.5	1.5	"	2.6	"	×(√)		36	5.0	3.1	1.8	"	2.0	"	√	
9	7.7	3.5	2.0	"	1.8	主震型	√		37	4.9	1.9	1.2	"	0.9	"	√	
10	7.4	4.1	2.4	孤立型	2.3	"	×(√)		38	4.7	2.2	1.4	"	1.4	"	√	
11	7.3	2.7	1.6	主震型	1.8	"	√		39	6.8	1.6	1.1	"	-0.4	震群型	×	
12	7.1	3.3	1.9	"	1.4	"	√		42	5.9	1.3	0.9	"	0.2	"	×	
13	6.8	2.6	1.6	"	0.8	"	√		45	5.6	1.0	0.7	"	-0.6	"	×	
15	6.7	1.2	0.8	"	1.7	"	√		47	4.8	1.3	0.9	"	-0.6	"	×	
16	6.5	1.4	1.0	"	1.6	"	√		51	4.3	1.4	1.0	"	-0.1	"	×	
17	6.4	2.0	1.3	"	1.1	"	√			4.4	1.5	1.0	"	-0.3	"	×	拜 城
18	6.3	3.4	2.0	"	1.9	"	√			4.0	1.0	0.7	"	1.0	主震型	√	山西太谷
19	6.2	4.8	2.7	孤立型	1.9	"	×(√)			4.1	0.9	0.7	"	0.3	震群型	×	山西平遥
21	6.2	2.8	1.7	主震型	1.5	"	√		外	5.1	1.4	1.0	"	1.4	主震型	√	1968.3.16 云南南华
23	6.2	2.8	1.7	"	1.4	"	√		推	6.5	3.9	2.2	"	0.3	震群型	×	1966.2.5. 云南东川
28	5.6	2.1	1.3	"	1.7	"	√		判	4.9	2.9	1.7	"	-0.1	"	×	1973.6.1 云南腾冲
29	5.6	2.7	1.6	"	2.3	"	√		断	7.3	2.1	1.3	"	-0.1	"	×	1976.5.29 云南龙陵
										6.2	2.3	1.4	"	1.7	主震型	√	1976.9.23 内蒙巴音木仁

表三

在表一 中序号	地名	强震 M ₁	M _{2m.y}	E ₁ (焦耳)	E ₂ (焦耳)	E ₂ /E ₁ %	判断 震型	予报今后 最大震级 M _m	实际 震型	实际今后最 大震级 M _m	检 验
10	渤海	7.4		7.95×10 ¹⁶	8.57×10 ¹²	0.11	主型	≤5.9	主型	4.6	√
8	甘孜	7.9		4.74×10 ¹⁶	1.38×10 ¹⁴	0.31	"	≤6.4	"	5.5	√
9	通海	7.7		2.24×10 ¹⁶	7.32×10 ¹³	0.33	"	≤6.2	"	5.7	√
12	昭通	7.1		2.82×10 ¹⁶	1.95×10 ¹²	0.07	"	≤5.6	"	5.7	√
11	海城	7.3		5.63×10 ¹⁶	2.53×10 ¹²	0.45	"	≤5.8	"	5.4	√
18	中甸	6.4		2.52×10 ¹⁴	1.53×10 ¹²	0.61	"	≤5.0	"	4.0	√
16	南坪	6.5		3.55×10 ¹⁴	2.73×10 ¹¹	0.08	"	≤5.1	"	4.7	√
15	普洱	6.7		7.08×10 ¹⁴	2.09×10 ¹²	0.30	"	≤5.3	"	4.2	√
22	柯坪	6.2		1.26×10 ¹⁴	3.81×10 ¹¹	0.30	"	≤4.8	"	3.2	√
28	南坪	5.6		1.59×10 ¹³	2.89×10 ¹⁰	0.18	"	≤4.2	"	3.9	√

续表三

在表一中序号	地名	强震 M_1	$M_{s, x m}$	E_1 (焦耳)	E_2 (焦耳)	$E_2/E_1\%$	判断震型	予报今后最大震级 M_m	实际震型	实际今后最大震级 M_m	检验
21	大邑	6.2		1.26×10^{14}	1.22×10^{10}	0.01	"	≤ 4.8	"	4.7	✓
23	康定	6.2		1.26×10^{14}	1.17×10^{12}	0.93	"	≤ 4.8	"	3.4	✓
30	南坪	5.5		1.12×10^{13}	1.98×10^9	0.02	"	≤ 4.1	"	4.1	✓
38	康定	4.7		7.08×10^{11}	1.00×10^{10}	1.41	震群型	4.7 ± 0.6	"	2.8	×
27	红河	5.6		1.59×10^{13}	2.20×10^{11}	1.39	"	5.6 ± 0.6	"	3.3	×
52	保山	5.8		3.16×10^{13}	1.61×10^{10}	0.05	主型	≤ 4.4	"	4.5	✓
34	吴忠	5.1		2.82×10^{12}	6.93×10^{10}	2.46	震群型	5.1 ± 0.5	"	3.0	×
37	宁晋	4.9		1.41×10^{12}	7.57×10^{10}	5.37	"	4.9 ± 0.5	"	(2.0)	×
13	甘孜	6.8		1.00×10^{15}	6.30×10^{13}	0.63	主型	≤ 5.4	主型	4.6	✓
2	普洱	6.2		1.26×10^{14}	9.30×10^9	0.01	"	≤ 4.8	"	2.6	✓
1	阳江	6.4		2.52×10^{14}	1.01×10^{11}	0.04	"	≤ 5.0	"	2.9	✓
5	阿合奇	5.4		7.59×10^{12}	2.86×10^9	0.04	"	≤ 4.0	"	2.3	✓
3	溧阳	5.5		1.12×10^{13}	7.30×10^9	0.07	"	≤ 4.1	"	2.3	✓
7	南郑	5.0		2.00×10^{12}	3.63×10^8	0.02	"	≤ 3.6	"	0.8	✓
19	河间	6.3		1.78×10^{14}	9.04×10^{13}	0.05	"	≤ 4.2	"	4.4	✓
29	双柏	5.6		1.59×10^{13}	5.69×10^9	0.04	"	≤ 4.9	"	3.3	✓
50	和顺	4.3	4.7	1.78×10^{11}	7.18×10^{11}	403.	震群型	≤ 4.1	震群	3.8	✓
40	东川	6.5		3.55×10^{14}	4.85×10^{12}	1.37	"	6.5 ± 0.6	"	6.2	✓
39	邢台	6.8		1.00×10^{15}	1.33×10^{13}	1.33	"	6.8 ± 0.6	"	7.2	✓
51	霍山	4.3	4.5	1.78×10^{11}	4.37×10^{11}	246.	"	≤ 3.9	"	2.9	✓
54	轮台	5.6		1.59×10^{14}	2.55×10^{12}	10.0	"	56 ± 0.6	"	5.3	✓
49	腾冲	4.9	5.0	1.41×10^{12}	2.51×10^{12}	178	"	≤ 4.4	"	1.8	✓
47	马边	4.8	5.4	1.00×10^{12}	5.89×10^{12}	155	"	≤ 4.8	"	4.3	✓
42	马边	5.9		4.47×10^{13}	4.10×10^{13}	91.8	"	59 ± 0.6	"	5.4	✓
44	康定	5.6		1.59×10^{13}	1.99×10^9	0.01	主型	≤ 4.2	"	5.7	×
76.5.29	龙陵	7.3	7.4	5.62×10^{15}	8.40×10^{15}	149	震群型	≤ 6.8	"	6.6	×
76.7.28	唐山	7.8		3.16×10^{15}	4.65×10^{15}	14.7	"	7.8 ± 0.6	主型	6.2	×
76.8.16	松潘	7.2		3.98×10^{15}	1.13×10^{13}	0.28	主震	≤ 5.4	震群	7.2	×

外推判断

表五

在表一中的代号	地名	强震 M_1	5天内最大地震 $M_{0.1}$	5天能量 E_0 (焦耳)	5天余震体积 V_0	估算总体积 $\tilde{V}$	α (焦耳/ Km^3)	估算总能量 E_0 (焦耳)	$E_0/E_{总}$	判断震型	$\sim E_{总}-E_0$	予报今后最大震级	实际最大震级	检验
8	甘孜	7.9		4.47×10^{16}	51900 Km^3	61800 Km^3	3.01×10^{11}	1.88×10^{16}	2.4	主型		≤ 6.4	5.5	>
9	通海	7.7		2.24×10^{16}	58520	69700	2.33×10^{11}	1.62×10^{16}	1.4	"		≤ 6.2	5.9	>
10	湖海	7.7		7.95×10^{15}	38780	46200	1.57×10^{11}	7.25×10^{15}	1.1	"		≤ 5.9	4.2	>
11	海城	7.3		5.66×10^{15}	25700	30800	1.38×10^{11}	4.22×10^{15}	1.3	"		≤ 5.8	5.2	>
12	昭通	7.4		2.82×10^{15}	9440	11040	1.06×10^{11}	1.17×10^{15}	2.4	"		≤ 5.6	5.7	>
13	甘孜	6.8		1.06×10^{15}	12240	14600	7.28×10^{10}	1.06×10^{15}	1.0	"		≤ 5.4	4.6	>
19	河间	6.3		1.78×10^{14}	4230	5030	3.76×10^{10}	1.90×10^{14}	0.9	"		≤ 4.9	4.4	>
22	柯坪	6.2		1.26×10^{14}	3800	4500	3.30×10^{10}	1.48×10^{14}	0.9	"		≤ 4.8	2.6	>
8	溧阳	5.5		1.12×10^{13}	700	838	1.83×10^{10}	1.11×10^{13}	1.0	"		≤ 4.1	2.3	>
39	邢台	6.8		1.03×10^{15}	(37250)	(44400)	(7.21×10^{10})	(3.21×10^{15})	(0.3)	震群型	(2.18×10^{15})	(7.0)	(7.2)	>
42	马边	5.9		8.35×10^{13}	4800	5790	2.24×10^{10}	1.30×10^{14}	0.6	"		5.9	5.4	>
44	康定	5.6	5.7	5.42×10^{13}	1900	2260	1.72×10^{10}	3.90×10^{13}	1.4	"		≤ 5.1	2.6	>
40	东川	6.5		3.59×10^{14}	10800	12900	4.88×10^{10}	6.30×10^{14}	0.6	"		6.4	6.2	>
14	霍布逊	6.8		1.05×10^{15}	13100	15600	7.28×10^{10}	1.13×10^{15}	0.9	主型		≤ 5.4	4.0	>
4	雷西	5.4		8.03×10^{12}	610	726	1.17×10^{10}	8.50×10^{12}	0.9	"		≤ 4.0	3.1	>
1976.5.29	龙陵	7.3	7.4	1.36×10^{16}	35000	41700	1.57×10^{11}	6.54×10^{15}	2.0	震群型		≤ 6.8	6.6	>
1976.7.26	唐山	7.8		3.63×10^{16}	70200	83700	2.67×10^{11}	2.23×10^{16}	1.6	主型		≤ 6.3	6.2	>
1976.8.16	松潘	7.2		4.00×10^{16}	37500	44600	1.48×10^{11}	6.62×10^{15}	0.6	震群型	2.62×10^{15}	7.1	7.2	>

外推判断

表四

表一中的 序号	地名	M_{max}	E总(焦耳)	V(公里) ³	α (焦耳/公里 ³)
8	甘孜	7.9	4.478×10^{16}	158000	2.834×10^{11}
9	通海	7.7	2.257×10^{16}	99800	2.262×10^{11}
10	渤海	7.4	7.960×10^{15}	43500	1.830×10^{11}
11	海城	7.3	5.677×10^{15}	36400	1.560×10^{11}
39	邢台	7.2	6.294×10^{15}	73600	8.552×10^{10}
12	昭通	7.1	2.869×10^{15}	25400	1.130×10^{11}
13	甘孜	6.8	1.064×10^{15}	14300	7.441×10^{10}
40	东川	6.5	4.907×10^{14}	10800	4.544×10^{10}
1	阳江	6.4	2.521×10^{14}	4260	5.918×10^{10}
19	河间	6.3	1.781×10^{14}	4340	4.104×10^{10}
22	柯坪	6.2	1.264×10^{14}	4670	2.707×10^{10}
42	马边	5.9	1.007×10^{14}	5020	2.006×10^{10}
44	康定	5.7	5.473×10^{13}	2560	2.137×10^{10}
8	溧阳	5.5	1.121×10^{13}	1010	1.110×10^{11}

(1979年12月13日收到)

参 考 文 献

- [1] 茂木清夫 1969 岩石破坏实验——地震现象解明のために 科学 39卷, 2.95—102
- [2] 地球所第三研究室实验组 1976 单轴压力下岩石破裂的初步研究 地球物理学报 vol19, №4, 306—316
- [3] Amos, N., J. R. Booker 1972, Aftershocks Caused by pore fluid flow Science 175, 4024, 885—887
- [4] 蜀水, 1976, 震源应力场岩石膨胀性和水的扩散作用 地球物理学报 vol19, №2, 74—93
- [5] Hugo Benioff, 1951, Earthquakes and rock Creep (Part 1; Creep Characteristics of rocks and the Origin of aftershocks) B. S. S. A vol41, №1, 31—61
- [6] Leon K nopoff 1972, model for aftershock Occurence, flow and fracture of rocks geophysical monograph 16 259—263
- [7] 大塚道男 1976 地震の起り方のシミュレーション第五部 余震とば何カ 地震 29卷, 2, 137—145
- [8] 谷继成等 1979 强余震的时间分布特征及其理论解释 地球物理学报 Vol22, №1, 32—45
- [9] 地球所 1971, 地震序列的基本类型及其在地震预报中的应用 地震战线 №7
- [10] 何志桐、谢挺 1977, 邢台地震系列的空间分布、构造应力场及其发生过程探讨 地球物理学报 Vol 20, №2 131—141
- [11] 冯德益等 1977 我国西部地区一些强震及中强震前后波速异常的初步研究(二) 地球物理学报 Vol20 №2 115—123