

从地震活动参数估计鲜水河断裂带的近期活动

闻 学 泽

(四川省地震局)

摘要

本文利用 b , N , E 等地震活动参数沿断裂带的时空扫描结果, 估计了鲜水河断裂带 1973—1982 近十年的活动特征, 初步总结了鉴别轻微滑动、弱粘滑、粘滑和闭锁等不同性质的断层活动段以及划分该断裂带短期活动阶段的地震活动参数综合指标。最后就该断裂带自 1973 年 6 月以来及 1981 年道孚 6.9 级地震前后, 从地震活动参数反映的断裂活动性质变化等问题, 进行了初步讨论。

一、基本思路

许多研究表明, b 值的时空变化, 较好地反映了不同地区在不同时期中所承受的平均应力和平均岩石强度的变化^[1-3]。C. H. Scholz(1968)的实验证明: 岩石中的差应力($\sigma_1 - \sigma_3$) 增加时, b 值明显下降; 如在 $4.000 \times 10^8 \text{ Pa}$ 围压下, 差应力从 $1.580 \times 10^8 \text{ Pa}$ 上升到 $1.5300 \times 10^9 \text{ Pa}$ 时, 花岗岩样微破裂的 b 值相应地从 0.69 下降到 0.45^[5]。茂木清夫则认为 b 值大小的不同, 反映了不同地区岩石介质性质的不同^[6,7]。多数学者认为, b 值反映一个地区承受平均应力和接近强度极限的程度, 亦即反映该区介质在构造应力场作用下所处的应力状态^[1,2]。

笔者设想: 若沿某一活动断裂带进行 b 值的时空扫描, 则这时的 b 值时空变化, 可能反映了断裂带本身在构造应力场的作用下应力状态的变化, 而这种来自于断裂带内部的变化信息, 就可能与大地震的孕育和发生有较密切的关系。

然而, 为了说明断裂带在一定时期中的活动特征, 仅靠 b 值是不够的。就反映地震活动与构造活动的关系而言, 地震频度 N 与地震能量 E 是两个较理想的参数。若按沿某一活动断裂带(或断层段)在某一时期中的地震统计得到的总频度 ΣN 和总能量 ΣE , 由

$$\bar{N} = \frac{\Sigma N}{l} \quad (1)$$

和

$$\bar{E} = \frac{\Sigma E}{\Sigma N} \quad (2)$$

本文 1984 年 2 月 13 日收到, 1985 年 3 月 7 日收到修改稿。

则可分别得到按断裂带或断层段长度 l 归一化的频度 \bar{N} 以及单位频次地震释放的平均能量 \bar{E} 。由于 \bar{N} 和 \bar{E} 分别刻划了不同断层段的地震密度 (地震数/km) 以及单位频次地震的大小, 故当 \bar{N} 一定时, \bar{E} 愈小, 说明此时的断层段是以小、弱震活动为主; \bar{E} 愈大, 则反映此时的断层段上是以零星强度较大的地震活动为特征。

因此, 若将 b , \bar{N} , \bar{E} 值同时作沿断裂带的时空扫描, 就可能较好地综合反映不同断层段上活动性质的差异。例如, 低 b 值、高 \bar{E} 值、 \bar{N} 值也较高的断层段, 可能属于断面强摩擦、伴有较大应力降、以平均强度较大的地震活动为主的断层段, 或粘滑活动段; 而高 b 值、低 \bar{N} , \bar{E} 值的断层段, 可能为弱摩擦、低应力降的轻微滑动 (稳滑) 断层段; 如果低 b 值、且 \bar{N} , \bar{E} 值也很低的断层段, 则可能属于活动极微弱的闭锁段。

笔者根据以上思路和假设, 对近期川西的北西向鲜水河断裂带上不同断层段的活动性质及其活动阶段进行初步划分和估计。本文将 b , \bar{N} , \bar{E} 等称为地震活动参数。

二、资料与方法

1. 地震资料

1973年2月炉霍7.9级地震发生后, 在鲜水河断裂带上的甘孜、道孚两地增设了地震

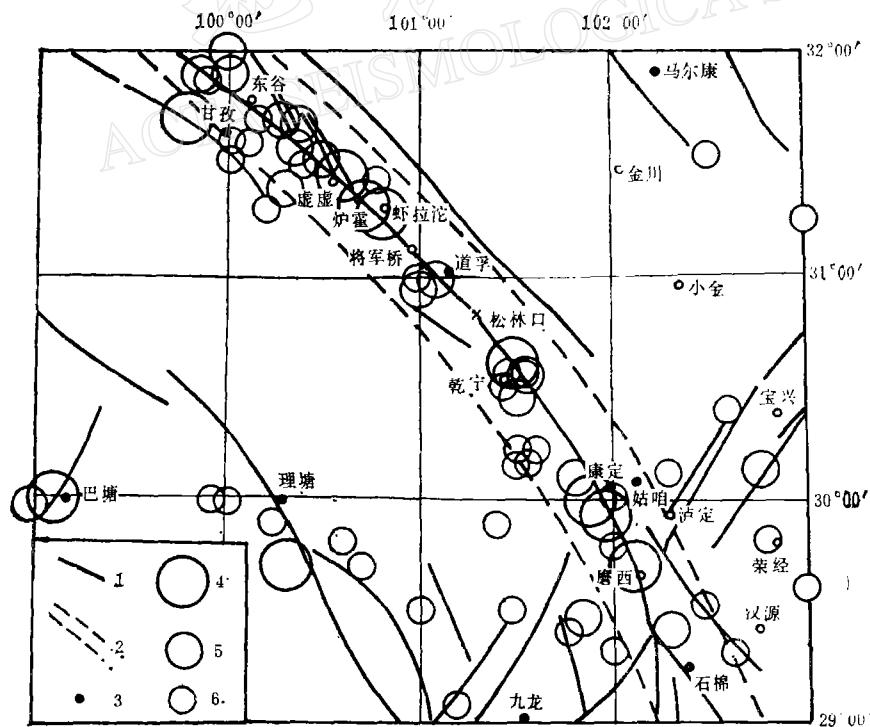


图1 鲜水河断裂带及邻区主要断裂和 $M \geq 5$ 地震震中

1. 主要断裂; 2. 地震资料选取范围; 3. 地震台; 4. $M = 7.0—7.9$; 5. $M = 6.0—6.9$; 6. $M = 5.0—5.9$

Fig. 1 The major faults and the epicenters ($M \geq 5$) along the Xianshuihe fault zone and adjacent areas

1. The major faults; 2. Area in which earthquake data have been collected; 3. Seismic station;
4. $M = 7.0—7.9$; 5. $M = 6.0—6.9$; 6. $M = 5.0—5.9$

台,从而在该带及其邻区形成一个由甘孜、道孚、康定、姑咱、石棉、九龙和理塘等台站组成的台网(图1)。统计表明:计算该带 b 值时不出现“低脑袋”的震级下限,北西段为 $M_L = 2.0$,南东段为 $M_L = 1.8$,因此将全带的选取震级下限定为 $M_L = 2.0$ 。以主干活动断裂为中线,划一 $400 \times 50 \text{ km}^2$ 的条带状区域(图1),从《四川台网地震目录》中选取该区域内 1973 年 6 月—1982 年 12 月 $M_L \geq 2.0$ 的 983 次地震资料,其中不包括炉霍 7.9 级地震的主要序列。条带区域宽度(50km)的确定主要考虑:(1)近年该断裂带地震活动条带的范围及震中测定的误差范围;(2)从地质角度确定的断裂带宽度,尽量不把其它断裂划入。从而认为,凡落在该条带区域内的地震,均发生在鲜水河断裂带上。

2. b , N , E 值沿断裂带的时空扫描

(1) 小区段 b^* 值空间扫描 将图1中的条带状区域从北纬 32° — 29° 按纬度 $10'$ 的间距划成 18 个小区段,分别统计和计算各小区段在 1973 年 6 月—1976 年 12 月、1977 年 1 月—1980 年 12 月两个时间段中的 b 值,记为 b^* ,然后沿断裂带走向作 b^* 值的空间扫描图象(图2,图3)。作 b^* 值空间扫描是为了初步了解沿断裂带 b 值分布的差异情况,因小区段范围小,地震数量较少,故 b^* 值的置信度不高,误差较大,只能作为进一步确定断层活动性差异分段的参考之一。

(2) 分段 \bar{b} , \bar{N} , \bar{E} 值空间扫描 在分析少数较大地震的位置并参考 b^* 值空间扫描图象的基础上,再将条带区域分成若干区段(每一区段包含一至数个小区段),重新统计和计算各区段的 b 值,记为 \bar{b} 。同时,将用(1)、(2)式计算的各区段的 \bar{N} , \bar{E} 值,与 \bar{b} 一同沿断裂带走向作空间扫描图象。另外,用整个断裂带的地震资料计算出前述两个时间段的两个总体累积 b 值,记为 Σb ,用来作为两个相应时间段中 \bar{b} 值沿断裂带走向异常变化的中值(图2,图3)。

(3) $b_{\text{年}}$, $N_{\text{年}}$ 和 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值的时间扫描 统计和计算整个断裂带 1973 年(6 月以后)—1982 年的逐年 $b_{\text{年}}$, $N_{\text{年}}$, $E_{\text{年}}$ 值。此时断裂长度为定值, $N_{\text{年}}$ 反映了逐年的频度变化,但 $E_{\text{年}}$ 与 $N_{\text{年}}$ 有关,故采用 $\bar{E}_{\text{年}} = E_{\text{年}}/N_{\text{年}}$ 得到按频度归一化的单位频次地震的平均能量 $\bar{E}_{\text{年}}$ 。将 $b_{\text{年}}$, $N_{\text{年}}$ 和 $\bar{E}_{\text{年}}$ 同时作时间扫描图象(图4)。

3. 计算与检验方法

b^* , \bar{b} , Σb 以及 $b_{\text{年}}$ 值的计算采用最大似然法公式^[1]:

$$b = \frac{N \lg e}{\sum_{K=1}^m (K - 1/2) \Delta M n_K} \quad (3)$$

式中: N 为地震总数, m 为分档数, n_K 为第 K 档地震数, 取分档间距 $\Delta M = 0.3$, 起始震级 $BM = 2.0$ 。一律采用近震震级 M_L 。对少数中、强震的面波震级 M_s , 由全国通用的经验公式:

$$M_s = 1.13 M_L - 1.08 \quad (4)$$

换算成 M_L 。文中对 \bar{b} , Σb 值的计算结果,进行了 χ^2 检验,结果均在 $\chi^2_{\alpha=0.01}$ 的显著性水平上通过(表1)。另采用最大似然法的误差公式:

$$\Delta b = 1.96 \frac{b}{\sqrt{N-1}} \quad (5)$$

表 1 沿断裂带走向 b 值空间扫描计算与 χ^2 检验Table 1 Calculation of spatial scanning of value b along the strike of the fault zone and χ^2 test $BM = 2.0$ $\Delta M = 0.3$

小区段	N	b^*	区段	N	b	自由度 ($f = m - 2$)	$\chi^2/\chi^2_{\alpha=0.01}$	1977年1月—1980年12月		
								小区段	N	b^*
1	13	0.768	东谷—虚虚	176	0.681	7	0.881	1	13	1.075
2	128	0.705	东谷—虚虚					2	22	0.937
3	35	0.579						3	16	0.965
4	16	0.834	炉霍—将军桥	24	0.916	5		4	4	0.965
5	8	1.158						5	9	0.965
6	15	0.626						6	14	0.751
7	8	0.681	将军桥—松林口	27	0.638	6		7	6	0.668
8	4	0.643						8	0	
9	10	1.114						9	9	0.745
10	4	0.643						10	14	1.351
11	15	1.174	乾宁—泸定西	43	0.98	3	0.549	11	7	1.351
12	9	0.745						12	13	0.918
13	5	1.316						13	21	0.965
14	28	1.192						14	33	1.209
15	31	0.718						15	15	0.779
16	9	1.133	泸定西—石棉	133	1.03	5	0.296	16	12	0.965
17	28	1.096						17	36	1.002
18	37	1.291						18	39	0.872
ΣN		Σb	$f = m - 2$				$\chi^2/\chi^2_{\alpha=0.01}$	ΣN		Σb
整个断裂带		403	0.758	7	0.805			$f = m - 2$		$\chi^2/\chi^2_{\alpha=0.01}$
								283		0.992
								7		0.75

计算了 \bar{b} , b_* 值的误差。由于(5)式的误差估值基本上是由大数定律决定的, 主要与地震次数有关, 故其对一些划分得较小的区段的 Δb 估值是明显偏大的(表 2、表 3)。但从 χ^2 检验结果看, 作为划分不同断层段基础的 \bar{b} 值是可信的。

地震能量 E 采用

$$\lg E = 11.8 + 1.5M_s \quad (6)$$

计算, 对于大多数 M_L 震级的地震, 则由(4)、(6)两式合并的

$$\lg E = 10.18 + 1.695M_L \quad (7)$$

求得, 然后再由(2)式计算 \bar{E} 值。

三、 \bar{b} , \bar{N} , \bar{E} 值空间扫描与不同性质断层段的划分

1. 1973—1976 年不同性质断层段的划分

1973 年 2 月炉霍 7.9 级大震后, 自同年 6 月至 1976 年 12 月, 鲜水河断裂带从地震活动参数上较明显地显示出活动性质的分段差异特点。根据这一时期 \bar{b} , \bar{N} , \bar{E} 等值沿断裂带走向的空间扫描结果, 运用前述基本思路分析, 可以初步划分出如表 2 及图 2 所示的 4

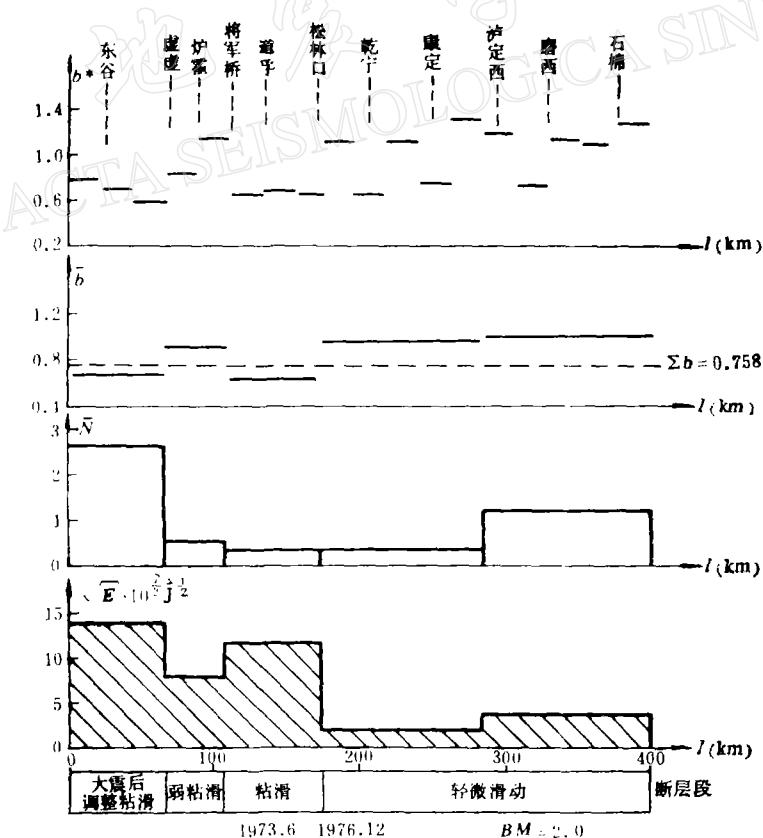


图 2 1973—1976 年地震活动参数空间扫描及不同性质断层活动段的划分

Fig. 2 Spatial scanning images of seismicity parameters and classifications of active fault segments with different behaviour (1973—1976)

个不同性质的断层活动段。

从表 2 及图 2 中看到, 这一时期的东谷—虚虚段及将军桥—松林口段, 均表现为低 \bar{b}

表 2 1973—1976 年不同性质断层段地震活动参数综合指标

Table 2 Composite indexes of seismicity parameters determining active fault segments with different behaviour during the period from 1973 to 1976

断层段(区段)	长度(km)	N	\bar{b}	Δb	\bar{N}	$\bar{E} \times 10^7 \text{ J}$	活动性质
东谷—虚虚	67.5	176	0.681	± 0.1	2.61	184.78	大震后调整粘滑
炉霍—将军桥	45	25	0.916	± 0.37	0.56	59.89	弱粘滑
将军桥—松林口	67.5	26	0.638	± 0.25	0.39	133.4	粘滑
乾宁—泸定西	110	43	0.98	± 0.29	0.39	5.815	轻微滑动
泸定西—石棉	110	133	1.03	± 0.18	1.21	13.68	(稳滑)

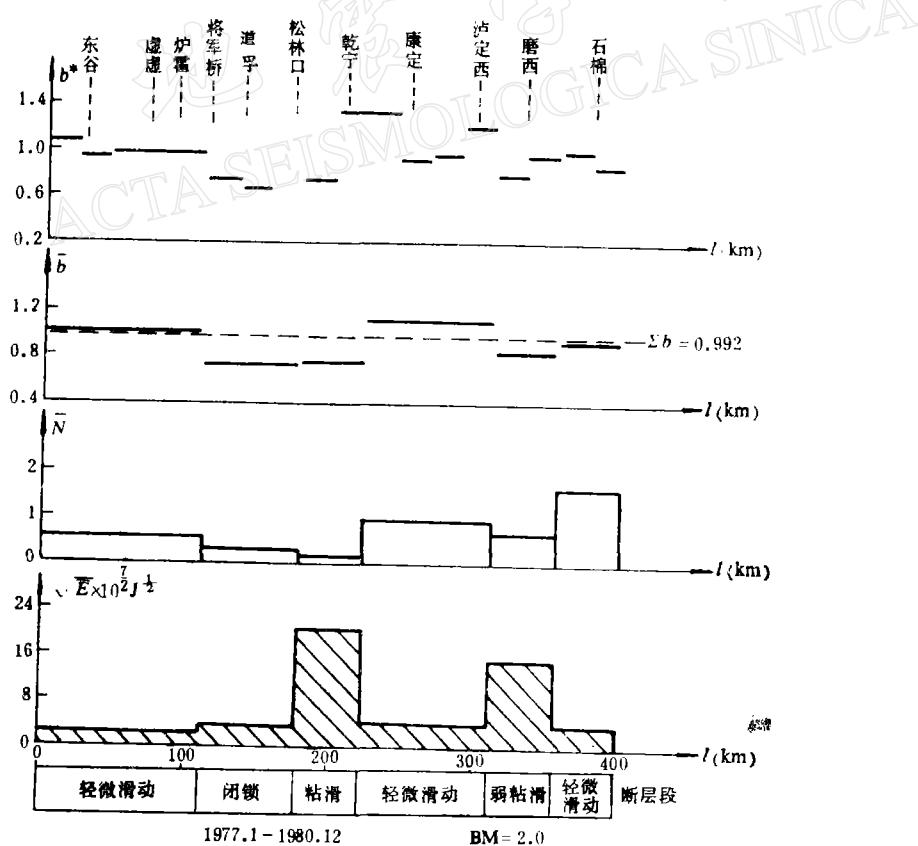


图 3 1977—1980 年地震活动参数空间扫描及不同性质断层活动段的划分

Fig. 3 Spatial scanning images of seismicity parameters and classifications of active fault segments with different behaviour (1977—1980)

值、高 \bar{E} 值的特点；但前一段的 \bar{N} 值较高，又包含了炉霍 7.9 级大震的震源区，属于与大震后调整滑动有关的粘滑段；后一段的 \bar{N} 值较低，应属于伴随零星平均强度较大的地震活动的粘滑段。乾宁—石棉段中显示了高 \bar{b} 值、低 \bar{E} 值以及较低 \bar{N} 值的特点，属于这一时期中的轻微滑动段；相比之下，将炉霍—将军桥段划为弱粘滑段。

2. 1977—1980 年不同性质断层段的划分

该断裂带在这一时期的地震活动特征与前一时期相比，有较明显的差别：地震总频度由前一时期的 403 次下降到 283 次； Σb 值则从前一时期的 0.76 相应上升到 0.99，说明了这一时期中的较大地震的次数，也比前一时期相应下降。根据 \bar{b} 、 \bar{N} 、 \bar{E} 值的空间扫描结果，初步划分出如表 3 及图 3 所示的 6 个不同性质的断层活动段。

表 3 1977—1980 年不同性质断层段地震活动参数综合指标

Table 3 Composite indexes of seismicity parameters determining active fault segments with different behaviour during the period from 1977 to 1980

断层段 (区段)	长 度 (km)	N	\bar{b}	Δb	\bar{N}	$\bar{E} (\times 10^7 \text{J})$	活动性质
东谷—将军桥	112.5	64	1.01	± 0.25	0.57	6.359	轻微滑动 (稳滑)
将军桥—松林口	67.5	20	0.72	± 0.32	0.30	10.14	闭 锁
松林口—乾宁	45	23	0.75	± 0.31	0.20	432.8	粘 滑
乾宁—泸定西	90	74	1.08	± 0.25	0.82	17.52	轻微滑动 (稳滑)
磨 西	40	27	0.86	± 0.33	0.68	242.51	弱粘滑
石 棉	45	75	0.93	± 0.21	1.67	17.86	轻微滑动 (稳滑)

其中，东谷—将军桥段表现为较高的 \bar{b} 值，低 \bar{N} 、 \bar{E} 值的特点，反映了该段已由前一时期的大震后调整粘滑和弱粘滑性质转变为轻微滑动性质。将军桥—松林口段（道孚地区包括在内）的 \bar{b} 、 \bar{N} 、 \bar{E} 值均为低值，可能说明这里在这一时期中为一活动十分微弱的断层闭锁段，在其南东的松林口—乾宁段，此时属于一粘滑段。这一时期的鲜水河断裂带南东段，分别存在乾宁—泸定西、石棉两个轻微滑动段以及磨西附近长约 40km 的弱粘滑段。

四、断裂带近期活动阶段的划分

用整个断裂带上的逐年 $b_{\text{年}}$ 、 $N_{\text{年}}$ 和 $\bar{E}_{\text{年}}$ 等值作为综合判断的指标，从时间上来考察该带自 1973 年 6 月至 1982 年 12 月近十年的总体活动特征，似可初步划分出以下几个活动阶段（表 4、图 4）：

1. 炉霍大震后调整滑动阶段（1973—1974） 主要特点是： $b_{\text{年}}$ 值很低、 $N_{\text{年}}$ 值高、 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值也较大，反映出整个断裂带在这两年中正处于不稳定的大震后剩余能量释放及应力状

态调整的滑动阶段。从图2看到，大部分能量的释放集中在炉霍7.9级地震震源区附近。

2. 稳定滑动阶段（1975—1976） 在这两年中，该带以频度不高的小、弱震活动为主，以相对稳定而弱的形式进行活动，与前一阶段相比， $b_{\text{年}}$ 值较迅速回升、 $N_{\text{年}}$ 值下降，而 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值则下降了1—2个数量级。

3. 应力加强阶段（1977—1979） $b_{\text{年}}$ 值在前期较高值背景上出现回降， $N_{\text{年}}$ 值也开始逐年下降，但 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值却逐年上升。这种现象可能反映了该断裂带经过前一阶段的稳定滑动后，又进入一个应力作用加强、地震与断裂活动性均较明显增强的阶段。

4. 震前平静阶段（1980） 道孚6.9级地震前的1980年，断裂带上出现了较明显的缺少较大地震的活动平静阶段。此阶段的 $N_{\text{年}}$ 值虽比1979年的略有回升，但 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值已下降

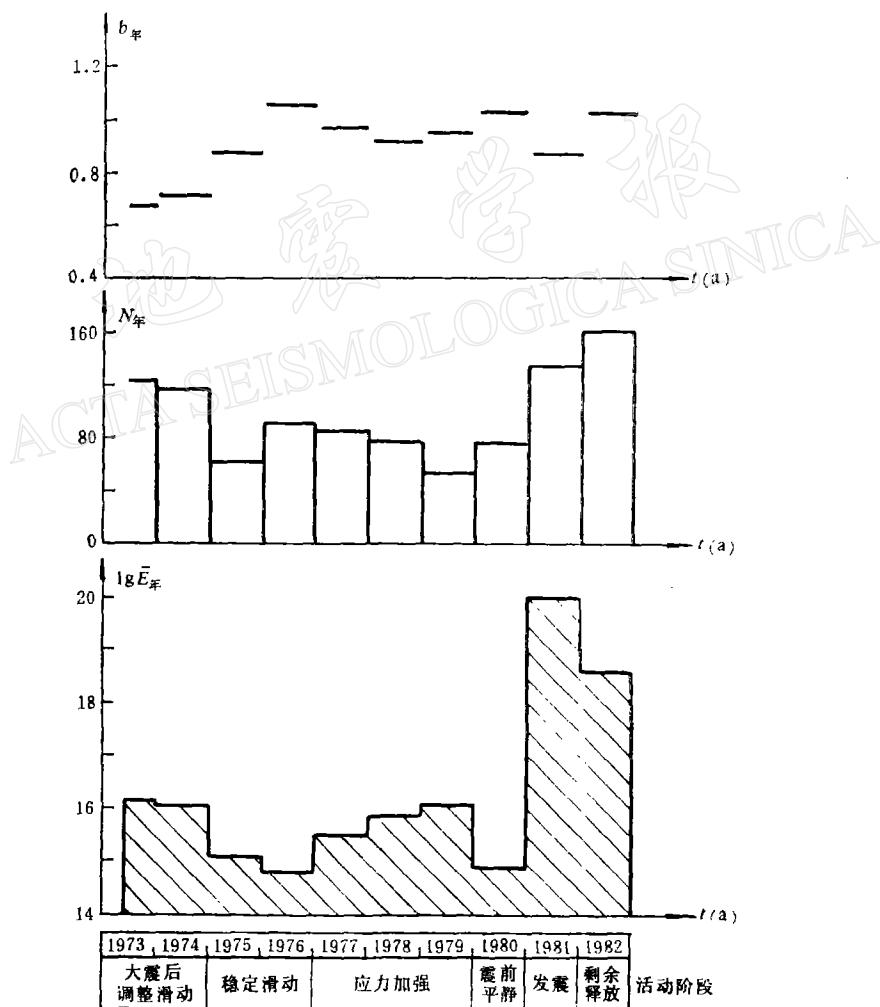


图4 地震活动参数时间扫描与断裂带近期活动阶段划分（1973. 6—1982. 12）

Fig. 4 Temporal scanning images of seismicity parameters and classifications of active stages of the fault zone in recent years (June 1973–Dec. 1982)

表 4 1973—1982 年断裂带活动阶段划分

Table 4 Classification of active stages of the fault zone during the period from 1973 to 1982

年	$b_{\text{年}}$	Δb	$N_{\text{年}}$	$\bar{E}_{\text{年}} (\times 10^7 \text{J})$	活动阶段
1973	0.663	±0.12	123	146.36	炉霍大震后调整滑动
1974	0.709	±0.13	117	124.94	
1975	0.875	±0.22	62	12.62	稳定滑动
1976	1.059	±0.22	91	6.37	
1977	0.965	±0.21	86	33.12	应力加强
1978	0.91	±0.20	78	76.92	
1979	0.948	±0.26	54	133.19	
1980	1.029	±0.23	75	7.73	震前平静
1981	0.871	±0.15	135	1046348.2	大释放(发震)
1982	1.029	±0.16	161	39224.4	剩余释放

到自 1973 年以来的最低值, 表现出仅有小、弱震活动; 同时, 这也是 $b_{\text{年}}$ 值比 1979 年的有所回升的原因。

5. 大释放(发震)阶段(1981) 它是伴随道孚 6.9 级地震发生的突变性活动阶段。从表 4 及图 4 中看到: 该阶段可从整个断裂带上的 $b_{\text{年}}$ 、 $N_{\text{年}}$ 以及 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值的较大幅度变化上反映出来。

6. 剩余释放阶段(1982) 此阶段中发生了甘孜 6.0 级地震(1982.6.16)。其 $b_{\text{年}}$ 、 $N_{\text{年}}$ 值比 1981 年有所上升, 但 $\bar{E}_{\text{年}}$ 值比起 1981 年的有明显下降, 从而反映出, 除了在伴随断裂带调整滑动的过程中发生甘孜 6.0 级地震外, 其余时间内均以小、弱震的较频繁活动为主。

五、讨 论

1. 从地震活动参数沿断裂带的空间扫描结果看到: 鲜水河断裂带中包括道孚地区在内的将军桥—松林口段, 在 1973—1976 年间表现为长约 67.5km 的粘滑活动段, 而在 1977—1980 年间转变为闭锁段, 1981 年 1 月 24 日在此闭锁段中发生了道孚 6.9 级地震, 其地表地震断层破裂长度为 44km^[10]。此例说明, 通过对地震活动参数沿断裂带走向的空间扫描, 划分不同性质的断层活动段, 寻找活动性微弱的断层闭锁段, 可能有助于判断未来强震发生的危险部位。另外, 地震活动参数的时间扫描结果反映: 道孚 6.9 级地震前的 1977—1980 年间, 鲜水河断裂带曾经历了应力加强和震前平静两个阶段。因此, 将沿断裂带地震活动参数的空间与时间扫描结合起来, 有可能了解断裂带近期活动的动态变化, 并可能从中提取有关的强震前兆信息。

2. 1977—1980 年间, 东谷—将军桥之间出现了长约 112.5km 长的轻微滑动断层段。在该段内的炉霍虾拉沱附近, 于炉霍 7.9 级大震后重建于断层上的房屋因这一时期的断层蠕动而开裂^[8], 虾拉沱场地跨断层地形变测量结果也反映了这一时期的断层蠕动^[8,9]。这

些现象说明，在用地震活动参数空间扫描结果确定的鲜水河断裂带内的一些轻微滑动段中，也可能包含有断层蠕动的性质。

3. 利用地震活动参数沿断裂带的时空扫描，研究断裂带近期活动的动态变化，并从中提取与强震孕育有关的异常信息，关键在于要有连续可靠、数量足够多的地震观测资料。在所划分的若干区段（断层段）中，有的会因为区段小、地震次数少而使得 \bar{b} 值置信度较低、误差较大，故区段的合理划分以及研究时间段的合理选择，是一个重要的问题。划分和选择方案不同，可能会出现不同的结果，这就需要事先对研究区的地震活动特征有细致的了解，从而选取一个既能反映各断层段间活动性的差异、又有较多地震次数的区段或时间段的划分方案。前述笔者对鲜水河断裂带区段的划分仍不够理想，使得少数区段的 \bar{b} 值误差较大。本文是利用地震活动参数沿断裂带的时空扫描来估计断裂带近期活动动态变化、并提取可能的强震前兆异常信息的初步试验。

参 考 文 献

- [1] 李全林、于 涠、郝柄林、陈锦标编著，地震频度—震级关系的时空扫描，地震出版社，1980。
- [2] 李全林，“ b 值”的物理意义和求法，地震 1982, 2: 46—47。
- [3] 马鸿庆，大、中地震前 b 值的区域分布，地球物理学报，25, 163—171, 1982。
- [4] 马鸿庆，华北地区几次大震前的 b 值异常变化，地球物理学报，21, 126—141, 1978。
- [5] Scholz, C. H., The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquake, *Bull. Seism. soc. Am.*, 58, 399—415, 1968.
- [6] Mogi, K., Study of elastic shucks caused by the fracture of heterogeneous materials and its relations to earthquake phenomena, *Bulletin of Earthquake Research Institute University of Tokyo*, 40, 125—173, 1962.
- [7] Mogi, K., Earthquakes and fractures, *Tectonophysics*, 5, 35—55, 1967.
- [8] 黄圣睦、刘本培、江在雄、黎定福，四川炉霍虾拉沱地震断层群，地震地质，4, 67—71, 1982。
- [9] 刘本培、李建中、李昌芝，1981年道孚6.9级地震的地壳形变，地壳形变与地震，1982, 4: 63—71。
- [10] 唐荣昌、钱洪、张文甫、张成贵、曹杨国、刘盛利，道孚6.9级地震的地质构造背景与发震构造条件分析，地震地质，6, 33—40, 1984。

ESTIMATING RECENT ACTIVITIES OF THE XIANSHUIHE FAULT ZONE BY EARTHQUAKE ACTIVITY PARAMETERS

WEN XUEZE

(Seismological Bureau of Sichuan Province)

Abstract

In this paper, the recent activities of the Xianshuihe Fault Zone during the period from 1973 to 1982 have been estimated by both spatial scanning and temporal scanning of earthquake activity parameters such as b , N , E along the fault zone. Some comprehensive indexes of the earthquake parameters for distinguishing different fault segments with variant active characters: light sliding, light stick sliding, stick sliding and locking, as well as for dividing different active stages of the fault zone into short period have been preliminarily summarized. Finally, the changes of activities of this fault zone reflected by earthquake activity parameters since June 1973, and before and after the Daofu Earthquake of magnitude 6.9 occurred in 1981 have been preliminarily discussed as well.