

郭祥云, 陈学忠, 李艳娥, 魏永刚, 陈丽娟. 2019. 震源机制一致性的显著性检验方法——以 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震前震序列为例. 地震学报, 41(6): 709–722. doi: 10.11939/jass.20190045.

Guo X Y, Chen X Z, Li Y E, Wei Y G, Chen L J. 2019. Significance test of focal mechanism consistency: Taking the foreshock sequence of the $M_{\text{S}}5.4$ Xiuyan earthquake on November 29, 1999 as an example. *Acta Seismologica Sinica*, 41(6): 709–722. doi: 10.11939/jass.20190045.

震源机制一致性的显著性检验方法^{*} ——以 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震前震序列为例

郭祥云¹⁾ 陈学忠^{1), †} 李艳娥¹⁾ 魏永刚¹⁾ 陈丽娟²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国重庆 401147 重庆市地震局

摘要 本文提出用四维空间的欧氏距离 D_{FM} 来表示不同地震震源机制之间的一致性, 并以 1975 年辽宁海城 $M_{\text{L}}7.3$ 地震序列和 1999 年辽宁岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震序列为例子分析了主震与前震和余震的震源机制一致性与 D_{FM} 值之间的关系, 其结果显示, 当欧氏距离 $D_{\text{FM}} < 50$ 时, 两次地震的震源机制接近. 为了对若干次地震组成的一组地震的震源机制一致性进行判定, 引入了显著性检验方法. 根据陈颙提出的震源机制一致性参数 K , 以符号检验法和统计检验量 Z 值检验法对岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震前小震的震源机制一致性进行了分析, 其结果表明, 在临近岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震前所发生地震的震源机制的一致性显著, 置信度可达 98%.

关键词 震源机制 一致性 显著性检验 1999 年岫岩 $M_{\text{S}}5.4$ 地震

doi: 10.11939/jass.20190045 中图分类号: P315.3⁺3 文献标识码: A

Significance test of focal mechanism consistency: Taking the foreshock sequence of the $M_{\text{S}}5.4$ Xiuyan earthquake on November 29, 1999 as an example

Guo Xiangyun¹⁾ Chen Xuezhong^{1), †} Li Yan'e¹⁾ Wei Yonggang¹⁾ Chen Lijuan²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Chongqing Earthquake Agency, Chongqing 401147, China

Abstract: This paper selected the Euclidean distance D_{FM} to measure the focal mechanism consistency between different earthquakes, and analyzed the relationship between the consistency of focal mechanism and D_{FM} value taking the 1975 $M_{\text{L}}7.3$ Haicheng earthquake sequence and 1999 $M_{\text{S}}5.4$ Xiuyan earthquake sequence as examples. The result shows that when D_{FM} is below 50 the two focal mechanisms become extremely consistent. In order to determine consist-

* 基金项目 中国地震局地球物理研究所基本业务专项(DQJB19B10)和国家重点研发计划(2018YFC1503405)共同资助.

收稿日期 2019-04-12 收到初稿, 2019-05-13 决定采用修改稿.

† 通信作者 e-mail: cxz8675@163.com



ency of a number of focal mechanisms the significance test method is drawn into. According to the consistency parameter K proposed by Chen Y, we investigated the consistency of focal mechanism for small earthquakes prior to the $M_{S5.4}$ Xiuyan earthquake using sign test and Z test. The result suggests that the focal mechanisms of small earthquakes occurred near the $M_{S5.4}$ Xiuyan main shock are significantly consistent with each other with confidence of 98%. Therefore the method proposed in this paper can be applied to practical earthquake prediction effectively.

Key words: mechanism; consistency; significance test; $M_{S5.4}$ Xiuyan earthquake in 1999

引言

在大震孕育期间, 断裂上可能发生小震, 断裂两侧地块中也可能发生小震, 但后者可能因原来介质中易滑面的方向不规则, 在应力作用下所产生的微裂隙方向也不尽相同, 因而该处发生的小震的震源机制可能也不相同, 且与断裂带上小震的机制不相同; 但至大震发生的短临阶段, 小震主要分布在断裂带上, 在高应力的背景下, 其受力方式均相似, 因而震源机制也相似。此外, 由于它们与主震都是发生在同一断裂上的错动, 所以其机制与主震震源机制也相似(郭增建等, 1973)。震源机制一致性或是区分前震序列与一般震群的有效途径之一。目前, 研究震源机制一致性的方法主要有: P 波与 S 波最大振幅比法(金严等, 1976; 陈颙, 1978)、谱振幅相关系数法(Lund, Böðvarsson, 2002; 崔子健等, 2015)、断层面参数法(陈颙, 1978)、主应力轴夹角差法(刁桂苓等, 1992, 1994, 2004; 程万正等, 2006; 李丽等, 2015; 孙丽娜等, 2017; 刘方斌等, 2018a, b)、最小旋转角法(万永革, 2008)、 P 轴分布集中度法(荣代潞, 2014; 韩晓明, 荣代潞, 2015)和应力张量非均匀性法(Michael, 1991; Wiemer *et al.*, 2002; 李金等, 2015; 张致伟等, 2015)。这些方法主要着眼于描述震源机制一致性的变化, 所得结果几乎都表明强震前中小地震的震源机制具有一致性增强的现象。震源机制一致性的提出始于前震的识别, 对于前震的认定, 时空范围要求非常严格, 前震一般发生在主震前 5 天以内, 距离主震震中 20 km 以内(陈颙等, 2015)。随着研究的深入, 震源机制一致性在地震趋势研判中应用越来越广泛, 但一直没有明确以下两个问题: 一是如何描述两个震源机制之间的一致性程度; 二是对于若干次地震组成的一组地震, 如何描述其震源机制一致性程度。为此, 本文拟着眼于以上两个问题, 利用统计显著性检验方法, 提出用四维空间的欧氏距离来表示不同地震震源机制之间的一致性, 并以 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 $M_{S5.4}$ 地震前震序列为例, 对震源机制一致性进行深入研究, 以期为地震预测研究提供可操作的具体方法。

1 方法

由一次地震的震源机制可给出两组节面的走向、倾角、滑动角, 以及主应力 P 轴、 T 轴和 B 轴的方位角和俯角。若断层面的走向、倾角、滑动角已知即可确定震源机制, 所以可用断层面的走向、倾角、滑动角这 3 个量来描述两次地震的震源机制一致性。但是, 对于中小地震, 由于难以确定震源机制的两个节面中哪个是断层面, 震源机制节面的走向、倾角、滑动角不便用于描述震源机制一致性。地震是在震源应力场的作用下发生, 只要两次地震的震源应力场一致, 其震源机制就应当一致, 因此可利用震源机制的主应力轴来描述震源机制一致性。由于我国上地壳内受到的应力场以水平向应力为主, 该方向应力对中国大陆地震的孕育和发生起着重要作用(郭增建等, 1977), 所以本文选取震源机制的 P 轴和 T 轴来描述震源

机制一致性. 设 φ 为方位角, θ 为俯角, P 轴和 T 轴的方位角和俯角($\varphi_P, \varphi_T, \theta_P, \theta_T$)对应于四维空间的一个点. 这样, 每次地震的震源机制可以对应于四维空间的一个点, 它们之间的一致性就可以用欧氏距离来描述. 对于地震 i 和 j , 其震源机制之间的欧氏距离为

$$D_{FM} = \left[(\varphi_P^i - \varphi_P^j)^2 + (\varphi_T^i - \varphi_T^j)^2 + (\theta_P^i - \theta_P^j)^2 + (\theta_T^i - \theta_T^j)^2 \right]^{1/2}, \quad (1)$$

D_{FM} 越小, 两个震源机制的一致性越好, 当 $D_{FM}=0$ 时, 两个震源机制完全一致. 但是, D_{FM} 小到什么程度就可以认为两个震源机制具有一致性呢? 为了解决这个问题, 本文利用 1975 年 2 月 4 日辽宁海城 $M_L 7.3$ 地震序列和 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 $M_S 5.4$ 地震序列的震源机制进行分析. 前者的震源机制采用顾浩鼎等(1976)的结果, 具体列于表 1; 后者的震源机制采用张萍和蒋秀琴(2001)的结果, 具体列于表 2. 利用表 1 和表 2 中的资料, 按照式(1)计算前震、余震与主震之间的欧氏距离 D_{FM} , 得到的结果分别列于表 1 和表 2 中的最后一列.

由表 1 最后一列的 D_{FM} 值可见: 海城 $M_L 7.3$ 地震序列 $M_S \geq 4.0$ 前震和余震的 D_{FM} 值分布在 14—42 范围之内的有 16 次, 占 69.57%, 分布在 131—160 之内的有 7 次, 占 30.43%. 两次前震的 D_{FM} 值分别为 18.85 和 15.55. 图 1 给出了不同 D_{FM} 值的前震和余震的震源机制图像, 同时也给出了海城 $M_L 7.3$ 地震的震源机制. 可以看出: D_{FM} 值分布在 14—42 之内的地震, 其

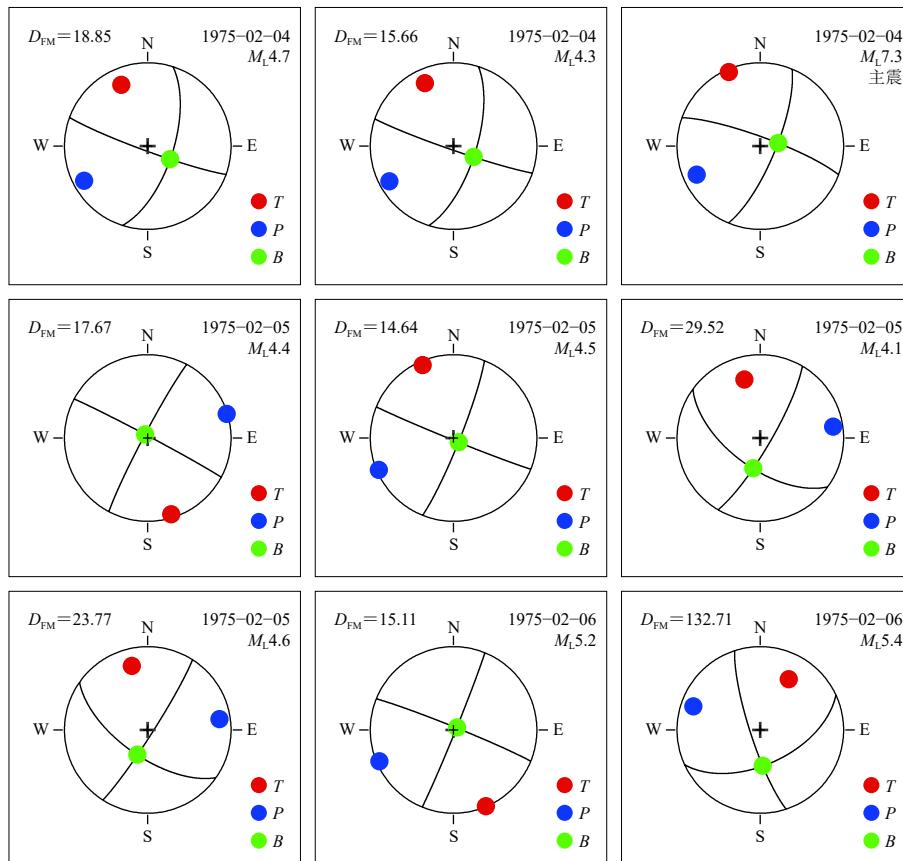


图 1 海城 $M_L 7.3$ 地震序列的震源机制图像和欧式距离 D_{FM} 值

Fig. 1 Focal mechanisms and Euclidean distance D_{FM} values of the $M_L 7.3$ Haicheng earthquake sequence

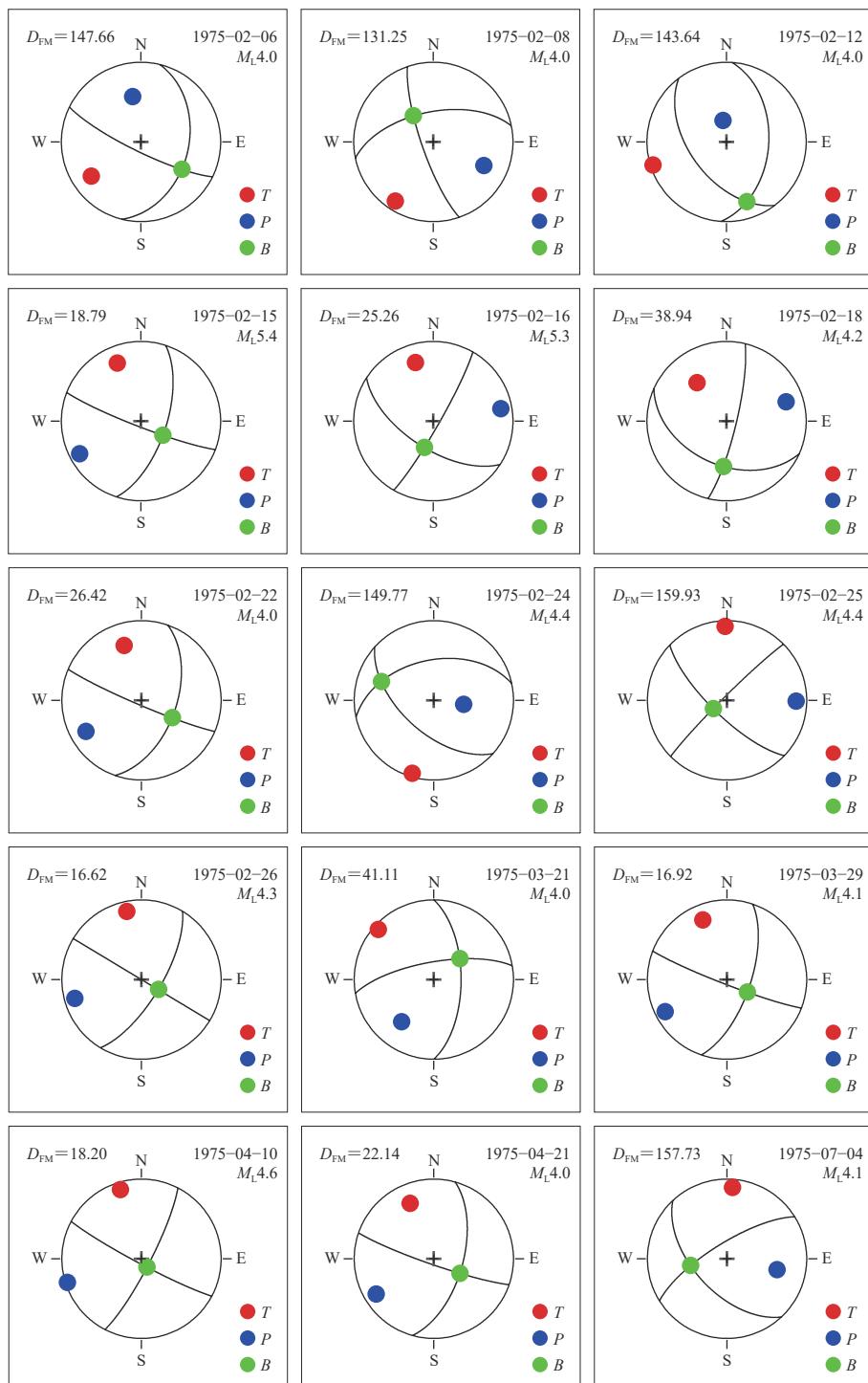
图 1 海城 $M_L 7.3$ 地震序列的震源机制图像和欧式距离 D_{FM} 值Fig. 1 Focal mechanisms and Euclidean distance D_{FM} values of the $M_L 7.3$ Haicheng earthquake sequence

表 1 海城 $M_L \geq 4.0$ 前震和余震的震源机制引自顾浩鼎等, 1976) 及其与主震之间的欧氏距离 D_{FM} 值Table 1 Focal mechanisms for $M_L \geq 4.0$ foreshocks and aftershocks of the $M_L 7.3$ Haicheng earthquake (after Gu et al., 1976) and their Euclidean distance D_{FM} value

序号	发震时刻 年-月-日 时: 分: 秒	地理坐标 东经 $^{\circ}$ 北纬 $^{\circ}$	M_L	深度 /km	节面 I			节面 II			P 轴	7 轴	B 轴	方位角 $^{\circ}$ 舫角 $^{\circ}$	D_{FM}	
					走向 $^{\circ}$	倾角 $^{\circ}$	滑动角 $^{\circ}$	走向 $^{\circ}$	倾角 $^{\circ}$	滑动角 $^{\circ}$						
1	1975-02-04 07: 50: 47.0	122.75 40.67	4.7	17	110	85	25.1	17	65	174.5	61	15	157	22	300	64
2	1975-02-04 10: 35: 35.0	122.78 40.67	4.3	15	109	86	22.1	17	68	175.7	61	13	155	18	297	68
3	1975-02-04 19: 36: 06.0	122.80 40.65	7.3	12	290	81	-15.2	23	75	-170.7	66	17.5	157	4	100	72.5
4	1975-02-05 01: 01: 45.0	122.93 40.70	4.4	10	298	88	4.0	208	86	178.0	252	2	343	4	143	86
5	1975-02-05 02: 56: 29.0	122.82 40.67	4.5	10	112	88	6.0	22	84	178.0	66	3	157	6	310	83
6	1975-02-05 12: 33: 00.0	122.77 40.68	4.1	10	126	61	11.5	221	80	150.5	268	28	171	13	59	59
7	1975-02-05 23: 52: 54.0	122.63 40.70	4.6	10	125	64	5.6	217	85	153.9	264	22	168	14	47	64
8	1975-02-06 05: 43: 42.0	122.90 40.62	5.2	23	292	87	-2.0	22	88	-177.0	67	3	338	0	231	86
9	1975-02-06 12: 24: 57.0	122.50 40.80	5.4	17	162	80	34.6	259	56	167.9	295	31	35	16	149	54
10	1975-02-06 13: 56: 16.0	122.83 40.75	4.0	10	116	80	-128.9	14	40	-15.7	169	41	56	25	304	38
11	1975-02-08 02: 30: 23.0	122.47 40.82	4.0	12	161	78	-31.8	262	59	-166.0	293	38	37	18	148	48
12	1975-02-12 20: 42: 46.0	122.78 40.70	4.0	7	143	52	-118.2	3	46	-58.9	171	68	73	3	341	22
13	1975-02-15 21: 08: 02.0	122.78 40.70	5.4	12	111	84	26.2	18	64	173.3	62	14	158	22	303	63
14	1975-02-16 22: 01: 26.0	122.80 40.68	5.3	11	123	62	6.8	30	84	151.8	260	15	163	24	20	62
15	1975-02-18 18: 51: 49.0	122.65 40.77	4.2	17	114	44	14.5	14	80	133.1	252	23	142	39	5	42
16	1975-02-22 15: 45: 14.0	122.73 40.70	4.0	12	113	85	36.2	19	54	173.8	60	21	162	29	300	54
17	1975-02-24 05: 07: 20.0	122.88 40.78	4.4	7	132	57	-52.9	258	48	-132.9	278	60	17	5	110	30
18	1975-02-25 04: 52: 10.0	122.62 40.73	4.4	14	134	74	-4.2	226	86	-164.0	276	14	180	8	62	74
19	1975-02-26 05: 09: 53.0	122.82 40.67	4.3	8	121	90	20.0	210	70	180.0	254	14	347	14	121	70
20	1975-03-21 11: 32: 59.0	122.95 40.77	4.0	11	260	72	-29.6	0	62	-159.5	38	34	132	7	231	56
21	1975-03-29 23: 16: 36.0	122.60 40.77	4.1	6	111	85	24.1	19	66	174.5	63	13	158	20	303	65
22	1975-04-10 03: 55: 37.0	122.48 40.72	4.6	10	118	85	9.0	27	81	184.9	253	3	163	10	357	80
23	1975-04-21 00: 17: 06.0	122.45 40.77	4.0	8	109	84	30.2	16	60	173.1	59	17	157	25	299	59
24	1975-07-04 07: 06: 29.0	122.67 40.72	4.1	10	137	56	-19.4	239	74	-144.4	283	36	185	12	80	52

表 2 岫岩 $M_S \geq 4.0$ 地震 $M_S \geq 4.0$ 前震和余震的震源机制解(引自张萍, 蒋秀琴, 2001)及其与主震之间的欧氏距离 D_{FM} 值
 Table 2 Focal mechanisms for $M_S \geq 4.0$ foreshocks and aftershocks of the $M_S 5.4$ Xiuyan earthquake
 (after Zhang, Jiang, 2001) and their Euclidean distance D_{FM} value

序号	发震日期		地理坐标		深度 /km	节面 I		节面 II		P 轴	T 轴	B 轴	方位角/ $^{\circ}$ 俯角/ $^{\circ}$	D_{FM}					
	年-月-日	时:分:秒	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$		走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$										
1	1999-11-09	07: 01: 40.6	123.03	40.53	4.1	9	320	70	7.5	228	83	159.8	261	26	358	11	208	70	159.33
2	1999-11-09	07: 07: 21.2	123.02	40.53	4.2	8	137	80	-7.1	228	83	-169.9	62	18	331	3	84	77	158.79
3	1999-11-25	20: 47: 48.5	123.00	40.55	4.0	8	137	44	29.5	27	70	130.0	56	25	150	8	11	38	39.46
4	1999-11-25	20: 55: 4.2	123.00	40.55	4.4	9	139	42	30.7	27	70	127.7	271	12	167	46	12	36	42.50
5	1999-11-26	23: 34: 01.0	123.02	40.53	4.4	9	110	70	10.6	24	80	159.7	246	15	152	12	46	67	17.00
6	1999-11-29	12: 10: 39.2	123.03	40.53	5.4	9	296	84	-20.1	28	70	-173.6	62	41	191	36	280	70	0
7	1999-11-29	12: 45: 50.4	123.03	40.53	5.1	9	300	70	173.6	206	84	20.1	12	40	262	22	193	68	11.36
8	1999-11-29	16: 16: 47.6	123.03	40.53	5.0	8	111	80	20.3	17	70	169.4	248	20	341	8	324	67	16.52
9	1999-11-30	07: 52: 55.8	123.03	40.53	4.0	9	111	68	13.0	15	78	157.5	262	32	162	15	348	65	24.78
10	1999-11-30	13: 58: 17.7	123.03	40.53	5.2	9	291	80	-16.3	26	74	-169.6	270	15	180	2	260	70	9.33
11	1999-11-30	14: 06: 55.1	122.98	40.55	4.9	8	292	72	10.5	197	80	161.7	41	22	133	10	166	70	18.25
12	1999-11-30	14: 09: 36.6	123.02	40.55	4.3	9	112	58	11.8	16	80	147.4	77	28	350	3	357	57	20.22
13	1999-11-30	20: 19: 44.2	123.03	40.53	4.3	9	295	83	-20.2	28	70	-172.5	293	25	37	25	279	70	4.69
14	1999-12-01	01: 47: 1.9	123.03	40.53	4.2	9	290	80	10.2	198	80	169.8	67	22	338	6	154	78	17.03
15	1999-12-01	04: 33: 0.5	123.03	40.53	4.4	9	110	80	30.5	14	60	168.4	4	28	274	0	307	60	20.71
16	1999-12-01	12: 45: 30.8	123.03	40.55	4.3	9	299	70	10.6	205	80	159.7	290	14	18	2	117	68	16.64
17	1999-12-13	05: 49: 30.5	123.08	40.53	4.1	11	137	60	23.3	36	70	147.9	79	42	346	2	8	52	38.18
18	1999-12-27	19: 27: 15.4	123.02	40.53	4.0	8	112	70	10.6	19	80	159.7	91	30	0	9	356	66	14.73
19	2000-01-12	07: 43: 55.4	123.05	40.53	5.5	8	146	80	-40.7	256	50	-166.9	70	25	333	13	139	50	140.51
20	2000-01-12	13: 01: 31.9	123.03	40.55	4.3	9	112	88	26.0	20	64	177.8	269	13	359	1	297	62	10.20

震源机制与主震极为接近;而 D_{FM} 值分布在131—160之内的地震,其震源机制与主震差别较大.

由表2最后一列的 D_{FM} 值可见:岫岩 $M_S5.4$ 地震序列 $M_L\geq 4.0$ 前震和余震的欧式距离 D_{FM} 值分布在4—43之内的有16次,占84.21%; D_{FM} 值分布在140—160之内的有3次,占15.79%;临近主震的3个前震的 D_{FM} 值分别为39.46, 42.5和17.0, 均在43以下.

通过上述对两个地震序列的前震和余震的 D_{FM} 值的分析,我们认识到,与主震震源机制相近的地震的 D_{FM} 值均在43以下.故对于两次地震而言,其震源机制相近的条件可以适当放宽至 $D_{FM}<50$.

对于若干次地震组成的一组地震,一般来讲各次地震的震源机制不一致,在这种情况下,可以用其欧式距离 D_{FM} 平均值确定与某次地震震源机制的一致性,但只能显示一致性的强弱,不能确定是否一致或在多大程度上一致.陈颙(1978)给出了参数 K 来描述一组地震震源机制的一致性,假设 N 次地震中震源机制一致的地震次数为 n_1 ,不一致地震的次数为 n_2 , K 定义为

$$K = \frac{n_1 - n_2}{N}, \quad (2)$$

K 在-1到1之间变化, $K>0$ 表示震源机制一致的地震比不一致的地震多,但是当 K 值为多大时一致性才显著尚未解决.本文将 N 次地震根据 D_{FM} 值分为两部分,一部分地震的次数为 n_1 , $D_{FM}>50$;另一部分地震的次数为 n_2 , $D_{FM}\geq 50$;然后,根据式(2)计算 K 值.当 $N\leq 25$ 时,可用符号检验法对一组地震的震源机制是否一致进行统计显著检验;当 $N\geq 25$ 时,可采用

$$Z = \frac{r - 0.5 - \frac{N}{2}}{\frac{\sqrt{N}}{2}} \quad (3)$$

统计检验量 Z 进行检验(张敏强, 2010).式(3)中: r 为 n_1 和 n_2 两者中的较大者; Z 为显著性水平 $\alpha=5\%$, 2%和1%下的临界值,分别为1.96, 2.33和2.58.一般地,如果 $Z\geq 1.96$,表示能通过 $\alpha=5\%$ 的显著性检验,可以认为这组地震震源机制的一致性显著.

2 岫岩 $M_S5.4$ 地震前小震震源机制一致性

本文将利用上述方法对岫岩 $M_S5.4$ 地震序列的震源机制与 $M_S5.4$ 主震震源机制之间的一致性进行分析.选取1999年1月至11月岫岩 $M_S5.4$ 主震发生前41次 $2.5\leq M_L\leq 3.9$ 小震的震源机制解(张萍等, 2003),其空间分布如图2所示,震

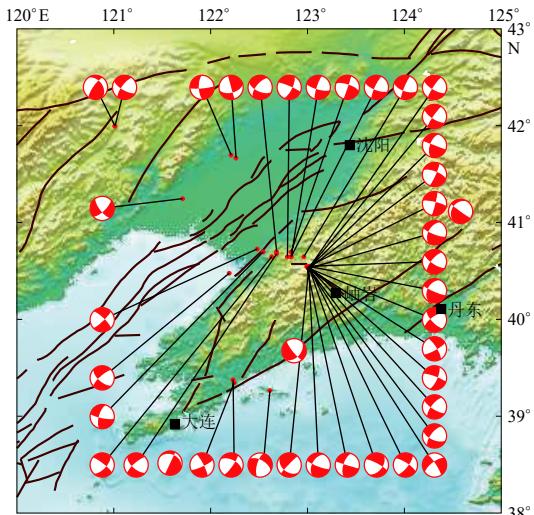


图2 岫岩 $M_S5.4$ 地震前小震震源机制解空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of focal mechanisms of small earthquakes occurred prior to the $M_S5.4$ Xiuyan earthquake

表 3 1999 年岫岩 $M_{5.4}$ 地震前小震震源机制Table 3 Focal mechanisms for small earthquakes before the $M_{5.4}$ Xiyuan earthquake in 1999

序号	发震日期		地理坐标		M_s	节面 I			节面 II			P 轴	T 轴	B 轴				
	年-月-日	时:分:秒	东经/ $^{\circ}$	北纬/ $^{\circ}$		深度 /km	走向/ $^{\circ}$	倾向	倾角/ $^{\circ}$	走向/ $^{\circ}$	倾向	倾角/ $^{\circ}$	方位角/ $^{\circ}$	俯角/ $^{\circ}$	方位角/ $^{\circ}$	俯角/ $^{\circ}$		
1	1999-01-15	03: 05: 18.6	122.62	40.65	3.4	11	128	WS	80	42	NW	62	261	26	358	11	110	59
2	1999-01-06	05: 43: 10.9	122.82	40.65	2.9	10	105	NE	76	17	ES	80	62	18	331	3	233	72
3	1999-01-20	07: 37: 43.4	122.53	40.70	3.2	12	101	NE	80	13	ES	70	56	25	150	8	259	65
4	1999-04-09	16: 31: 48.0	121.00	42.00	3.0	15	138	WS	52	32	ES	70	271	12	167	46	12	43
5	1999-04-23	21: 13: 38.4	122.82	40.70	2.9	7	107	WS	70	20	NW	86	246	15	152	12	13	68
6	1999-04-27	15: 14: 14.4	124.57	41.12	2.8	13	125	NE	85	40	ES	30	62	41	191	36	304	30
7	1999-04-30	21: 16: 13.3	122.85	39.68	2.7	5	142	NE	78	60	NW	42	12	40	262	22	152	39
8	1999-05-11	12: 29: 25.9	122.78	40.65	3.4	14	114	WS	80	27	NW	70	248	20	341	8	90	68
9	1999-05-15	01: 45: 46.6	122.22	39.38	3.1	10	118	WS	55	35	NW	80	262	32	162	15	50	52
10	1999-05-22	20: 40: 45.1	122.47	40.73	3.4	9	133	WS	82	46	NW	80	270	15	180	2	93	78
11	1999-05-24	15: 58: 35.1	122.20	41.70	2.5	28	86	NW	80	0	NE	68	41	22	133	10	246	67
12	1999-05-29	03: 13: 30.9	121.00	42.00	3.3	21	119	NE	70	34	ES	72	77	28	350	3	253	64
13	1999-06-03	01: 46: 50.2	122.25	41.67	3.4	8	75	NW	64	164	NE	90	293	25	37	25	164	64
14	1999-06-06	16: 51: 47.4	122.82	40.65	2.8	14	110	NE	70	26	ES	80	67	22	338	6	231	66
15	1999-08-21	12: 56: 25.9	121.70	41.25	2.7	21	142	NE	70	45	NW	70	4	28	274	0	183	61
16	1999-08-31	15: 11: 21.0	122.23	39.35	2.9	14	153	WS	80	64	NW	80	290	14	18	2	108	75
17	1999-09-06	05: 05: 30.3	122.67	40.70	3.1	6	114	NE	58	41	ES	64	79	42	346	2	252	47
18	1999-09-20	13: 22: 57.0	122.67	40.68	2.9	5	136	NE	62	52	ES	76	91	30	0	9	256	58
19	1999-10-10	07: 21: 15.5	122.95	40.65	2.8	9	109	NE	59	24	ES	80	70	25	333	13	219	56
20	1999-10-12	16: 04: 20.3	122.18	40.48	3.4	14	132	WS	80	46	NW	80	269	13	359	1	87	74
21	1999-11-04	14: 46: 26.9	122.60	39.27	3.5	7	118	WS	57	14	ES	70	152	39	252	5	348	50

续表 3

序号	发震日期		地理坐标		Ms	深度 /km	节面 I		节面 II		P 轴	T 轴	B 轴	
	年-月-日	时:分:秒	东经 $^{\circ}$	北纬 $^{\circ}$			走向 $^{\circ}$	倾向	倾角 $^{\circ}$	走向 $^{\circ}$	倾向			
22	1999-11-09	03: 34: 1.3	121.57	38.52	3.9	9	114	NE	62	22	ES	90	270	37
23	1999-11-09	08: 21: 36.2	123.00	40.53	2.9	8	118	NE	70	32	ES	80	77	20
24	1999-11-09	17: 44: 44.6	123.00	40.53	3.6	8	121	NE	70	34	ES	80	80	20
25	1999-11-16	18: 57: 48.5	123.00	40.53	3.0	9	110	NE	90	20	ES	60	61	21
26	1999-11-17	03: 09: 31.4	123.00	40.53	2.7	9	112	WS	70	24	NW	82	249	20
27	1999-11-17	23: 59: 50.8	123.00	40.55	2.5	9	102	WS	80	14	NW	84	239	11
28	1999-11-18	08: 15: 41.2	123.00	40.53	2.8	9	111	NE	80	29	ES	50	62	37
29	1999-11-21	00: 50: 1.9	123.00	40.55	3.0	8	122	NE	72	40	ES	70	81	28
30	1999-11-25	00: 59: 19.2	123.00	40.55	3.0	8	112	NE	80	32	ES	42	60	39
31	1999-11-25	21: 17: 50.8	123.00	40.53	3.5	8	138	NE	70	55	ES	70	96	30
32	1999-11-25	22: 08: 12.4	123.00	40.53	3.2	8	147	WS	76	61	NW	80	285	18
33	1999-11-25	23: 19: 17.5	123.00	40.55	3.2	8	110	WS	80	24	NW	70	246	20
34	1999-11-26	03: 18: 23.3	123.00	40.55	2.7	9	123	NE	72	39	ES	70	80	27
35	1999-11-26	23: 36: 20.7	123.00	40.53	3.1	9	112	NE	60	38	ES	60	77	40
36	1999-11-27	01: 33: 26.6	123.00	40.53	2.6	8	148	WS	80	53	ES	68	192	21
37	1999-11-27	02: 29: 43.7	123.00	40.55	2.8	8	122	WS	74	38	NW	68	260	23
38	1999-11-27	15: 48: 2.6	123.00	40.55	3.2	8	118	WS	80	36	NW	50	250	37
39	1999-11-28	08: 15: 3.6	122.98	40.55	3.3	8	108	NE	86	20	ES	62	60	21
40	1999-11-29	05: 56: 59.9	123.00	40.55	3.2	9	121	NE	80	31	ES	47	61	37
41	1999-11-29	09: 25: 51.2	123.00	40.53	2.7	8	126	NE	38	44	ES	86	99	37

源机制解参数列于表3. 图3给出了这些小震与主震之间 D_{FM} 值的变化, 可见: D_{FM} 值集中分布在4—45和84—163这两个区间, 前者有30次, 后者有11次. 在临近主震发生的1999年11月份, 共发生21次小震, 其中 $D_{FM} \leq 45$ 的17次, $D_{FM} \geq 84$ 的4次. 按上述方法, 以 $D_{FM}=50$ 将地震进行划分, 不会影响结果.

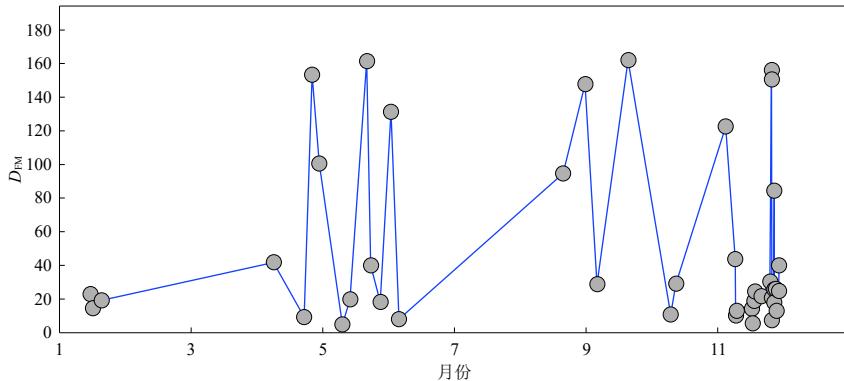


图3 1999年岫岩 $M_s 5.4$ 地震前各次小震的欧式距离 D_{FM} 值变化

Fig. 3 Variation of Euclidean distance D_{FM} values of small earthquakes prior to the $M_s 5.4$ Xiuyan earthquake in 1999

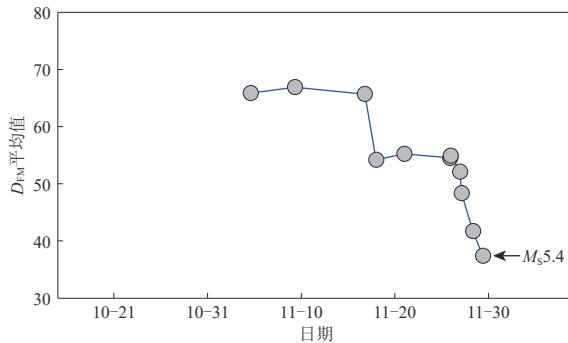


图4 1999年岫岩 $M_s 5.4$ 地震前欧式距离 D_{FM} 平均值随时间的变化

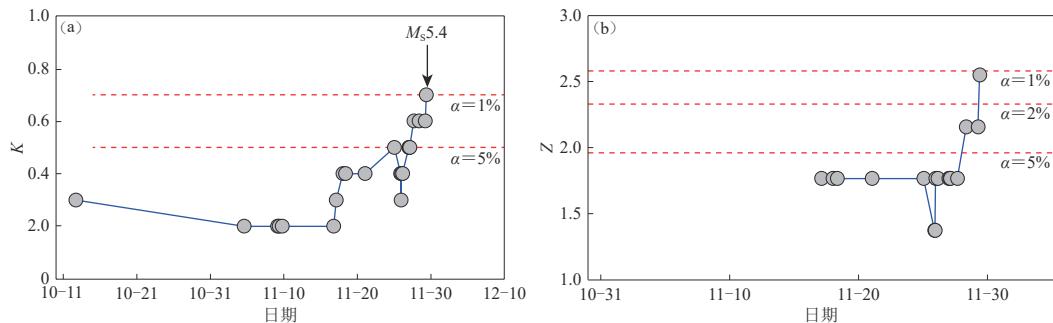
Fig. 4 Temporal variation of average Euclidean distance D_{FM} value prior to the $M_s 5.4$ Xiuyan earthquake in 1999

$\alpha=5\%$ 下通过显著性检验, 表示这20次地震的震源机制一致性的置信度可达95%; 当 $n_1=17$ 时, 可以在显著性水平 $\alpha=1\%$ 下通过显著性检验, 表示这20次地震的震源机制一致性的置信度可达99%. 从图5a中可以看出: 至1999年11月27日, K 值达到0.6, 超过 $\alpha=5\%$ 的显著性水平检验的临界值; 最后, K 值达到 $\alpha=1\%$ 显著性水平检验的临界值, 即最后20次地震的震源机制一致性的置信度高达99%.

取26次地震为一组, 按式(3)计算 Z 值进行检验. 以1次地震进行滑动, 得到 Z 值随时间的变化, 如图5b所示. 可见: 在临近主震发生时, Z 值最高可达2.55, 超过 $\alpha=2\%$ 的显著性水平检验的临界值, 即最后26次地震的震源机制一致的置信度超过98%.

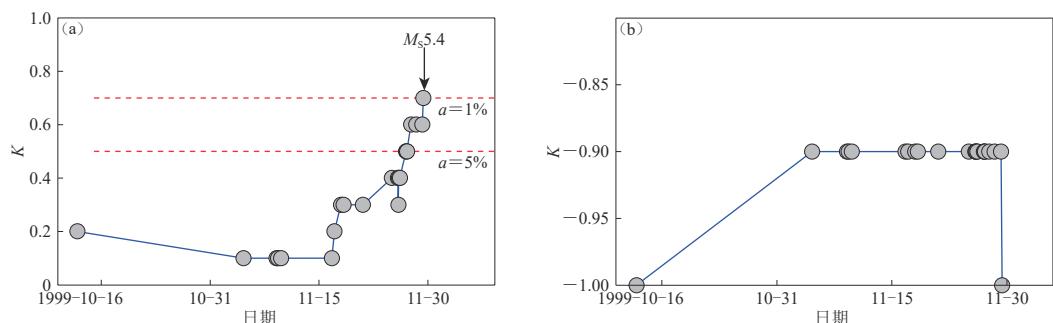
取20次地震为1组, 计算其 D_{FM} 平均值, 以2次地震进行滑动, 得到 D_{FM} 平均值随时间的变化, 如图4所示. 可以看出: D_{FM} 平均值从1999年11月中旬开始逐渐下降, 临近主震发生前降至最低. 尽管这样, D_{FM} 平均值与震源机制一致性之间的相关性仍然存疑.

同样取20次地震为一组, 以 $D_{FM}=50$ 为界, 将地震分为两组, 然后按式(2)计算 K 值. 以1次地震进行滑动, 得到 K 值随时间的变化, 如图5a所示. 查阅符号检验表可知, 在 $N=20$ 的情况下: 当 $n_1=15$ 时, 可以在显著性水平

图 5 1999 年岫岩 $M_{5.4}$ 地震前 K 值(a)和 Z 值(b)随时间的变化水平线分别表示通过 $\alpha=1\%$, 2% 和 5% 的显著性水平检验的临界值Fig. 5 Temporal variation of K value (a) and Z value (b) prior to the $M_{5.4}$ Xiuyan earthquake in 1999Horizontal lines show the critical values at the significance level $\alpha=1\%$, 2% and 5%

3 震源机制一致性检验方法在地震预测中的应用

上述分析是在主震震源机制已知的情况下,通过计算前震与主震的欧式距离 D_{FM} 值而进行的,而在地震预测实际工作中,主震尚未发生,其震源机制未知.这种情况下,可以在已经发生的若干次地震中,选取一次地震的震源机制作为主震的震源机制,计算其它地震与该地震之间的 D_{FM} 值,再利用上述方法进行分析.表 3 中最后一次地震与主震之间的 D_{FM} 值为 40,其震源机制与主震一致,若将其震源机制作为主震的震源机制,所得 D_{FM} 值如图 6a 所示,可以看出与图 4 中给出的结果基本一致.而表 3 中第 36 次地震与主震之间的 D_{FM} 值为 84,其震源机制与主震不一致,若将其震源机制作为主震的震源机制,所得 D_{FM} 值如图 6b 所示,可见与图 4 中给出的结果相差甚远,因此,若某次主震的前震中有与主震震源机制一致的地震,那么在主震发生前将该地震的震源机制当成主震的震源机制进行分析,所得结果与之后发生的主震得到的结果完全一致.因此,本文提出的方法能较好地应用于实际地震预测.

图 6 以表 3 中第 41 号(a)和第 36 号(b)地震的震源机制分别作为主震的震源机制所得的岫岩 $M_{5.4}$ 地震前 K 值随时间的变化Fig. 6 Temporal variation of K value prior to the $M_{5.4}$ Xiuyan earthquake taking the focal mechanism of No. 41 (a) and No. 36 (b) earthquake in Table 3 as that of the main shock

4 讨论与结论

地震发生的根本原因是应力作用下的岩石破裂。陈颙(1978)发现邢台地震和海城地震前, 中小地震的破裂方式趋于一致, 也就是说, 岩石在高应力背景的作用下, 微裂隙的方向基本相同, 即中小地震的破裂方式相同, 并基于这样的物理认识, 提出震源机制一致性可以作为描述地震活动的新参数, 即用一组地震震源断层面走向均值的标准偏差, 或用震源机制解参数来描述地震机制的一致或混乱程度, 以探索孕震区内背景构造应力场的动力学过程。该方法中震源机制一致性参数是个相对的概念。泽仁志玛等(2009, 2010)提出用震源机制一致性参数来研究应力场取向的变化, 以此来获取构造运动的情况及强震的前兆信息。但该方法需要事先确定背景应力场, 因此具有很大的不确定性, 而且对于如何描述两个震源机制之间的一致性程度以及对于若干次地震组成的一组地震, 如何描述其震源机制一致性程度均无明确的回答。鉴于此本文提出了利用震源机制的 P 轴和 T 轴的方位角和俯角来计算两次地震之间的震源机制欧式距离 D_{FM} , 并分析了 1975 年辽宁海城 $M_L 7.3$ 地震序列和 1999 年辽宁岫岩 $M_S 5.4$ 地震序列的主震与前震和余震的震源机制一致性与 D_{FM} 值之间的关系。结果表明, 当 $D_{FM} < 50$ 时, 二者震源机制接近。在此基础上, 利用符号检验法和统计检验量 Z 值检验法对岫岩 $M_S 5.4$ 地震前小震的震源机制一致性进行了分析, 所得结果表明, 在岫岩 $M_S 5.4$ 地震前发生的短临地震, 其震源机制一致性显著, 置信度达 98%, 故本文提出的方法可以在地震预测实际工作中得以有效应用。当然, 本文仅提出了震源机制一致性参数的计算方法及两个震例的研究, 具体的震情判断指标尚需进一步研究。下一步如果能在基于应力状态演化的物理背景下结合其它观测手段进行地震预测, 将会更加行之有效。这还需要更多震例的研究, 或更长时间的检验。

参 考 文 献

- 陈颙. 1978. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数 [J]. 地球物理学报, 21(2): 142-159.
- Chen Y. 1978. Consistency of focal mechanism as a new parameter in describing seismic activity[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 21(2): 142-159 (in Chinese).
- 陈颙, 刘杰, 杨文. 2015. 前震序列的图像特征研究 [J]. 中国地震, 31(2): 177-187.
- Chen Y, Liu J, Yang W. 2015. Pattern characteristics of foreshock sequences[J]. *Earthquake Research in China*, 31(2): 177-187 (in Chinese).
- 程万正, 阮祥, 张永久. 2006. 川滇次级地块震源机制解类型与一致性参数 [J]. 地震学报, 28(6): 561-573.
- Cheng W Z, Ruan X, Zhang Y J. 2006. Types of focal mechanism solutions and parameter consistency of the sub-blocks in Sichuan and Yunnan Provinces[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(6): 561-573 (in Chinese).
- 崔子健, 李志雄, 陈章立. 2015. 云南景谷 $M_S 6.6$ 、云南沧源 $M_S 5.5$ 地震谱振幅相关系数特征分析 [J]. 地震研究, 38(4): 535-540.
- Cui Z J, Li Z X, Chen Z L. 2015. An analysis of correlation coefficient characteristic of spectral amplitude of Jinggu $M_S 6.6$ earthquake and Cangyuan $M_S 5.5$ earthquake[J]. *Journal of Seismological Research*, 38(4): 535-540 (in Chinese).
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1992. 震源机制解的系统聚类分析: 以海城地震序列为例 [J]. 中国地震, 8(3): 86-92.
- Diao G L, Yu L M, Li Q Z. 1992. Hierarchical clustering analysis of the focal mechanism solution: Taking the Haicheng earthquake sequences for example[J]. *Earthquake Research in China*, 8(3): 86-92 (in Chinese).
- 刁桂苓, 于利民, 李钦祖. 1994. 强震前后震源区应力场变化一例 [J]. 地震学报, 16(1): 64-69.
- Diao G L, Yu L M, Li Q Z. 1994. One case of variation in the focal stress prior to a strong earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 16(1): 64-69 (in Chinese).

- 刁桂苓,赵英萍,啜永清,王勤彩,高景春,曹肃朝,王焱,朱振兴. 2004. 大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J]. *内陆地震*, 18(3): 202-206.
- Diao G L, Zhao Y P, Chuo Y Q, Wang Q C, Gao J C, Cao S C, Wang Y, Zhu Z X. 2004. Coherence characteristics of focal mechanism solutions of later-period strong aftershocks[J]. *Inland Earthquake*, 18(3): 202-206 (in Chinese).
- 顾浩鼎,陈运泰,高祥林,赵毅. 1976. 1975年2月4日辽宁省海城地震的震源机制[J]. *地球物理学报*, 19(4): 270-285.
- Gu H D, Chen Y T, Gao X L, Zhao Y. 1976. Focal mechanism of Haicheng, Liaoning Province, earthquake of February 4, 1975[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 19(4): 270-285 (in Chinese).
- 郭增建,秦保燕,徐文耀,汤泉. 1973. 震源孕育模式的初步讨论[J]. *地球物理学报*, 16(1): 43-48.
- Guo Z J, Qin B Y, Xu W Y, Tang Q. 1973. Preliminary study on a model for the development of the focus of an earthquake[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 16(1): 43-48 (in Chinese).
- 郭增建,秦保燕,张远孚,黎在良. 1977. 从水平力和垂直力的相互作用讨论我国境内地震的孕育和发生[J]. *地球物理学报*, 20(3): 242-250.
- Guo Z J, Qin B Y, Zhang Y F, Li Z L. 1977. A discussion on the mutual action of horizontal and vertical stresses in the development of earthquake sources in China[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 20(3): 242-250 (in Chinese).
- 韩晓明,荣代潞. 2015. 美国南加州地区1981—2011年 $M_w \geq 6.0$ 地震前发震应力场与构造应力场趋于一致现象研究[J]. *地震学报*, 37(6): 948-958.
- Han X M, Rong D L. 2015. Consistency of seismogenic stress field of preshocks to the tectonic stress field before eight earthquakes ($M_w \geq 6.0$) in southern California of United States from 1981 to 2011[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 37(6): 948-958 (in Chinese).
- 金严,赵毅,陈颙,鄢家全,卓钰如. 1976. 辽宁省海城地震前震震源错动方式的一个特点[J]. *地球物理学报*, 19(3): 156-164.
- Jin Y, Zhao Y, Chen Y, Yan J Q, Zhuo Y R. 1976. A characteristic feature of the dislocation model of foreshocks of the Haicheng earthquake, Liaoning Province[J]. *Acta Geophysica Sinica*, 19(3): 156-164 (in Chinese).
- 李金,周龙泉,龙海英,聂晓红,郭寅. 2015. 天山地震带(中国境内)震源机制一致性参数的时空特征[J]. *地震地质*, 37(3): 792-803.
- Li J, Zhou L Q, Long H Y, Nie X H, Guo Y. 2015. Spatial-temporal characteristics of the focal mechanism consistency parameter in Tianshan (within Chinese territory) seismic zone[J]. *Seismology and Geology*, 37(3): 792-803 (in Chinese).
- 李丽,宋美琴,刘素珍,扈桂让. 2015. 山西地区震源机制一致性参数时空特征分析[J]. *地震*, 35(2): 43-50.
- Li L, Song M Q, Liu S Z, Hu G R. 2015. Spatial-temporal characteristics of the consistency parameter of focal mechanisms in Shanxi area[J]. *Earthquake*, 35(2): 43-50 (in Chinese).
- 刘方斌,曲均浩,李国一,田兆阳. 2018a. 山东长岛震群震源机制解一致性参数时空演化特征[J]. *地震工程学报*, 40(5): 1034-1041.
- Liu F B, Qu J H, Li G Y, Tian Z Y. 2018a. Spatial-temporal characteristics of the focal mechanism solutions consistency parameter of Changdao earthquake swarm[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 40(5): 1034-1041 (in Chinese).
- 刘方斌,曲均浩,李亚军,范晓易,苗庆杰. 2018b. 山东乳山地震序列震源机制解一致性参数特征[J]. *地震地质*, 40(5): 1086-1099.
- Liu F B, Qu J H, Li Y J, Fan X Y, Miao Q J. 2018b. Research on characteristics of the focal mechanism solutions consistency of Rushan earthquake sequence, Shandong Province[J]. *Seismology and Geology*, 40(5): 1086-1099 (in Chinese).
- 荣代潞. 2014. 研究中强地震前中小地震震源机制变化的一种方法[J]. *地震工程学报*, 36(2): 286-291.
- Rong D L. 2014. Analyzing changes of focal mechanism of small-moderate earthquakes before a moderate-strong earthquake[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 36(2): 286-291 (in Chinese).
- 孙丽娜,李皓,齐玉妍,温超,刁桂苓. 2017. 2004年12月26日印度尼西亚 $M_w 9.0$ 大震前后震源机制一致性变化特征研究[J]. *中国地震*, 33(3): 424-431.
- Sun L N, Li H, Qin Y Y, Wen C, Diao G L. 2017. A study on forecast method of focal mechanism consistency before the $M_w 9.0$ Indonesia earthquake on December 26, 2004[J]. *Earthquake Research in China*, 33(3): 424-431 (in Chinese).
- 万永革. 2008. 美国 Landers 地震和 Hector Mine 地震前震源机制与主震机制一致现象的研究[J]. *中国地震*, 24(3):

216–225.

- Wan Y G. 2008. Study on consistency of focal mechanism of mainshock and that of preshocks in Landers and Hector Mine earthquake in United States[J]. *Earthquake Research in China*, **24**(3): 216–225 (in Chinese).
- 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 王晓山, 冯向东. 2009. 千岛岛弧2006年 M_w 8.3地震前震源机制解的一致性变化[J]. *地震学报*, **31**(4): 467–470.
- Zeren Z M, Diao G L, Li Z X, Wang X S, Feng X D. 2009. Variation of focal mechanism consistency before 2006 Kuril Islands arc M_w 8.3 earthquake[J]. *Acta Seismologica Sinica*, **31**(4): 467–470 (in Chinese).
- 泽仁志玛, 刁桂苓, 李志雄, 王晓山, 冯向东. 2010. 大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化[J]. *地震*, **30**(1): 108–114.
- Zeren Z M, Diao G L, Li Z X, Wang X S, Feng X D. 2010. Consistent distribution of stress before strong earthquake from focal mechanism[J]. *Earthquake*, **30**(1): 108–114 (in Chinese).
- 张敏强. 2010. 教育与心理统计学[M]. 北京: 人民教育出版社: 253–256.
- Zhang M Q. 2002. *Educational and Psychological Statistics*[M]. Beijing: People's Education Press: 253–256 (in Chinese).
- 张萍, 蒋秀琴. 2001. 岬岩—海城 M_s 5.4地震序列的震源机制解及应力场特征[J]. *地震地磁观测与研究*, **22**(2): 76–82.
- Zhang P, Jiang X Q. 2001. The focal mechanism solutions and the crust stress field characteristics in Xiuyan-Haicheng (M_s 5.4) earthquake sequence[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **22**(2): 76–82 (in Chinese).
- 张萍, 于龙伟, 李涯, 连安民, 刘天阁, 吴野, 杨红艳. 2003. 岬岩—海城5.4级地震前小震震源机制解与记录特征分析[J]. *地震地磁观测与研究*, **24**(1): 29–38.
- Zhang P, Yu L W, Li Y, Ze A M, Liu T G, Wu Y, Yang H Y. 2003. An analysis on the focal mechanism solutions of small earthquakes and the record characteristics before the Xiuyan-Haicheng earthquake of 5.4[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **24**(1): 29–38 (in Chinese).
- 张致伟, 周龙泉, 龙锋, 阮祥. 2015. 汶川8.0和芦山7.0级地震序列应力场时空特征[J]. *地震地质*, **37**(3): 804–817.
- Zhang Z W, Zhou L Q, Long F, Ruan X. 2015. Spatial and temporal characteristic of stress field for Wenchuan M_s 8.0 and Lushan M_s 7.0 earthquake sequence[J]. *Seismology and Geology*, **37**(3): 804–817 (in Chinese).
- Lund B, Böðvarsson R. 2002. Correlation of microearthquake body-wave spectral amplitudes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(6): 2419–2433.
- Michael A J. 1991. Spatial variations in stress within the 1987 Whittier Narrows, California, aftershock sequence: New techniques and results[J]. *J Geophys Res*, **96**(B4): 6303–6319.
- Wiemer S, Gerstenberger M, Hauksson E. 2002. Properties of the aftershock sequence of the 1999 M_w 7.1 Hector Mine earthquake: Implications for aftershock hazard[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **92**(4): 1227–1240.