

营口—海城地区震群的震源机制一致性特征^①

曹凤娟¹, 张 博¹, 杨牧萍¹, 袁 超², 邵媛媛¹, 钱 蕊¹

(1. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034; 2. 大连地震台, 辽宁 大连 528000)

摘要:采用 P 波初动方法计算 1999 年以来营口—海城地区 5 次震群序列的中小地震震源机制解, 并定义震源机制一致性参数 θ 为中小地震震源机制解 3 个正交的应力主轴与华北地区构造应力场 3 个应力主轴在三维空间的夹角之和。计算结果显示: 营口—海城地区震群中较大地震发生前 10 天~2 个月, θ 都有一个持续低值的过程; 1999 年岫岩前震序列的 θ 变化幅度在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间, 且大部分小于 65° 。相比用震源机制 P 轴取向趋于一致来判定震源区应力状态, θ 更有其优越性。

关键词: 营口—海城地区; P 波; 震群; 震源机制一致性参数; 应力

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2016)01-0004-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2016.01.0004

Focal Mechanism Consistency Features of Earthquake Swarms in Yingkou—Haicheng Area

CAO Feng-juan¹, ZHANG Bo¹, YANG Mu-ping¹, YUAN Chao², SHAO Yuan-yuan¹, QIAN Rui¹

(1. Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, Liaoning, China;

2. Dalian Seismic Station, Dalian 528000, Liaoning, China)

Abstract: We solved the five focal mechanisms of moderate and small swarm earthquakes occurring since 1999 in Yingkou and Haicheng using the P-wave first-motion method. We defined the sum of the inclinations of three orthogonal and principal stress axes of the focal mechanisms for the moderate and small earthquakes and that of the tectonic stress field in corresponding areas in the 3D coordinate system as parameter of the consistency of the mechanisms. It is a quantitative index used to measure the release stress field of an earthquake source and the conformance degree of the regional tectonic stress field. The conformance degree of the regional stress field and the focal mechanisms increase as the value decreases. The conformance degree of the regional stress field and the focal mechanisms of moderate and small earthquakes are higher because of the enhanced tendency of the regional tectonic stress field and higher possibility of occurrence of a stronger earthquake in the future. The result shows that the parameter of the consistency of the focal mechanisms was reduced to a minimum value of approximately 10~60 days before the occurrence of larger earthquakes for the earthquake swarms in Yingkou and Haicheng. Time and fluctuation range of the low value may be related to the characteristics of the earthquake swarm. The consistency parameter fluctuated significantly in common swarms such as the 2008 Haicheng earthquake swarm and the 2012 and 2013 Qingshiling earthquake swarms in Gaizhou City. All the mean values of the consistency parameter were greater than 125° . The value was low before the

① 收稿日期: 2015-03-10

基金项目: 辽宁省科学技术计划项目“辽宁省重点地震构造地震危险性研究”(2014231003); 辽宁省地震局重点实验室项目“辽宁省地震活动性研究”(LZ-Z201501-2); 辽宁省地震局重点实验室项目“未来 1—3 年辽宁省 6~7 级地震高危区研究”(LNDZ2014003); 2016 年震情跟踪定向任务“金州断裂应力状态及地震危险性研究”(2016020104)

作者简介: 曹凤娟(1970—), 女, 高工, 主要从事地震学分析与研究工作。E-mail: cao99@sina.com。

occurrence of the two stronger earthquakes ($M_{5.4}$ on November 29, 1999 and $M_{5.1}$ on January 12, 2000) in the foreshock sequence in Xiuyan. The value varied between 20° and 30° , and the minimum value was less than 65° . The consistency parameter did not vary significantly, and the mean value is not high (73°) for the 2014 earthquake swarms of Xihaiyu and Gaizhou, thus indicating some strengthening tendency of the stress field. However, because the consistency parameter is not consistently low, further research must be conducted in the future. Nevertheless, the parameter of consistency of focal mechanism is more useful for judging the stress condition in the focal region than using the P-axis trend of focal mechanism.

Key words: P-wave; focal mechanism; stress; earthquake swarm

0 引言

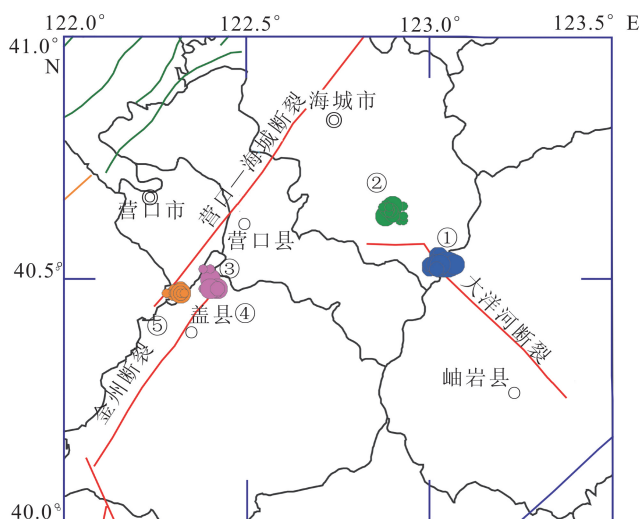
地震是地下介质受到应力作用而产生破裂的结果,震源机制解是研究构造应力场的基本资料,可以揭示地震破裂的力学机制,反映出地震等效释放应力场,因此通过对中小地震震源机制特征的研究,可以及时获得区域构造应力场的时空变化^[1-3]。目前关于震源机制方法在地震短期预报中的研究应用很多。如张萍等^[4-6]利用 P 波初动解获得的震源参数用于 1999 年岫岩 5.4 级地震序列性质与海城地区震群特征研究,认为较大地震前 P 轴取向由紊乱趋于一致,进而也可以判断震区的应力状态。陈颢^[7]根据强震震例,指出在震源机制的一致程度方面前震、余震和震群有明显的差别,并提出了描述一群地震活动性方面的一个“群体”参数——震源机制一致性,并赋予这个参数定量化。之后部分学者利用震源机制一致性参数分别研究了大同晚期强余震、张北强余震和干岛岛弧地震等^[8-10],结果不同程度显示大震发生前孕震区震源机制一致性参数比较低,震源机制与构造应力场的差异较小,说明这些前震受到了震源区应力场的统一作用,而主震发生之后震源机制解的一致性参数比较高,说明后续发生的地震的震源机制散乱,表明背景应力场的控制作用开始减弱。由此可见,将震源机制一致性参数用在震群或较大地震发生后的趋势判定中,或许可得到一定的短临信息。

营口—海城地区属辽宁省的老震区,1975 年海城 7.3 级和 1999 年岫岩 5.4 级地震就发生在该地区。2008 年以来该区震群活动此起彼伏,其震群性质的判定无疑是当前辽宁省震情跟踪工作的重点。因此,本文将计算 1999 年以来营口—海城地区震群的震源机制,并与辽宁地区构造应力场进行对比分析,在此基础上,利用震源机制解一致性参数方法来

分析营口—海城地区震群的震源机制一致性特征,以期对震群性质判定和辽宁地区的短临预测工作提供参考。

1 资料和方法

根据曹凤娟等^[11]整理的辽宁地区震群资料,考虑到震源机制解计算的最小震级和统计样本数等问题,本文选取 1999 年以来发生在营口—海城地区的 $M_L \geq 2.5$ 地震次数超过 20 次的 5 次震群序列(表 1)。空间分布上,1999 年岫岩 $M_{5.4}$ 地震序列和 2008 年海城 $M_{L4.8}$ 震群序列发生在 NW 向大洋河断裂附近,而 2012、2013 和 2014 年盖州震群序列则发生在 NE 向的金州断裂和营口—海城断裂的阶区附近(图 1)。



①:1999 年岫岩;②:2008 年海城;③:2012 年盖州青石岭;
④:2013 年盖州青石岭;⑤:2014 年盖州西海城

图 1 1999 年以来营口—海城地区研究所用震群分布

Fig.1 Distribution of earthquake swarms in Haicheng—Yingkou area since 1999 used in the study

表 1 1999 年以来营口—海城地区震群序列基本信息
Table1 Basic information of earthquake swarms in Haicheng—Yingkou area since 1999

序号	起止时间	地点	持时/天	最大地震/ M_L	发震时间	$M_L \geq 2.5$ 频次/次
1	1999-11-09—2000-06-30	岫岩	201	5.4(M)	1999-11-29	91 *
2	2008-11-03—2009-04-19	海城	168	4.8	2008-11-14	34
3	2012-02-02—2012-12-23	盖州青石岭	324	4.8	2012-02-02	22
4	2013-03-30—2013-05-07	盖州青石岭	41	4.0	2013-03-30	24
5	2013-12-23—2014-10-04	盖州西海域	283	4.3	2014-08-22	26 *

注:带 * 号的频次为 $M_L \geq 3.0$ 地震的频次

首先选择各震群中 P 波初动较清晰、至少被 10 个以上台站记录的 $M_L \geq 2.5$ 地震波形,利用 P 波初动法计算各震群的震源机制解,然后根据刁桂苓等^[8]定义的震源机制一致性参数 θ ,分析震源区应力状态及其随时间的变化特征。该方法的基本思路:将一个区域的应力场分为背景应力场和变化应力场,背景应力场主要反映区域内的应力状态,研究是否存在一个较为稳定的空间取向,认为这种稳定的空间取向对强震起着控制作用。变化应力场反映的是区域内小范围短时间的变化、扰动,通过研究变化应力场取向的变化来发现构造运动的情况及强震的前兆信息^[10]。如果构造应力场的空间方向由 3 个相互正交的应力主轴表示(即 σ_1 、 σ_2 、 σ_3),震源机制解的取向由 3 个相互正交的应力 P 轴、B 轴、T 轴表示,则定义震源机制和构造应力场的一致性参数 θ (以下简称一致性参数)为:

$$\theta = \alpha + \beta + \gamma$$

如图 2 所示,其中 $\alpha = \angle \sigma_1 OP$; $\beta = \angle \sigma_2 OB$; $\gamma = \angle \sigma_3 OT$ 。这与陈颖^[7]提出的震源机制解一致性参数的本质是一样的,即主要利用中小地震的震源机制与背景应力场的偏离程度来描述大震发生前应

力场的变化情况。根据许忠淮等^[12-13]和汪素云等^[14]的研究,华北地区构造应力场的总体特征是中等应力轴(B 轴)基本直立,最大主压应力轴(P 轴)和最小主压应力轴(T 轴)近乎水平,总体方向为 NEE-SWW 和 NNW-SSE。由此推断华北构造应力场的参数分别为:最大主压应力轴方向 $\sigma_{1az} = 80^\circ$ 、倾角 $\sigma_{1ih} = 90^\circ$;中间轴方向 $\sigma_{2az} = 0^\circ$ 、倾角 $\sigma_{2ih} = 0^\circ$;最小主压应力轴方向 $\sigma_{3az} = 170^\circ$ 、倾角 $\sigma_{3ih} = 90^\circ$ 。本文将华北构造应力场做为研究所用的背景应力场,进而在三维空间计算各震群的震源机制一致性参数 θ 。 θ 的最大值为 270° ,最小值为 0° 。

2 结果分析

图 3 为 5 次震群序列的震源机制各个参数每 10° 间隔的归一频数分布。由图 3 可见,2008 年海城 4.8 级震群的 P 轴方位有三个优势方向,即 NE、NNW 和近 EW 向[图 3(a)],其中 P 轴方位在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 和 $200^\circ \sim 230^\circ$ 之间的地震有 7 次,占 24.1%;在 $60^\circ \sim 110^\circ$ 和 $240^\circ \sim 290^\circ$ 之间有 10 次,占 34.5%;在 $150^\circ \sim 170^\circ$ 和 $330^\circ \sim 350^\circ$ 之间有 6 次,占 20.7%。2012 年和 2013 年盖州青石岭两次震群的 P 轴方位总体上较分散,其中 2012 年震群中 71.4% 的地震 P 轴在 $60^\circ \sim 140^\circ$ 和 $240^\circ \sim 320^\circ$ 之间[图 3(b)],2013 年震群中 52% 的地震 P 轴在 $80^\circ \sim 160^\circ$ 和 $260^\circ \sim 340^\circ$ 之间呈 NNW 向分布[图 3(c)]。而 2014 年盖州西海域 4.3 级震群 P 轴方位的优势展布与 1999 年岫岩 5.4 级地震序列的展布接近,大部分位于 $NE50^\circ \sim 70^\circ$ 之间[图 3(d)和图 3(e)],其中 2014 年盖州西海域震群的 P 轴 80.8% 在 $40^\circ \sim 70^\circ$ 和 $220^\circ \sim 250^\circ$ 之间,1999 年岫岩震群的 P 轴 85.9% 在 $50^\circ \sim 90^\circ$ 和 $230^\circ \sim 270^\circ$ 之间。2014 年盖州 4.3 级震群和 1999 年岫岩 M5.4 地震序列的 P 轴角度与华北构造应力场的主应力轴接近,表明这两次地震序列受华北构造应力场的作用较强。盖州青石岭两次震群的 P 轴展布可能与其所处金州断裂和营口—海城断裂的阶区部位有关,或许由于所在区域应力场较

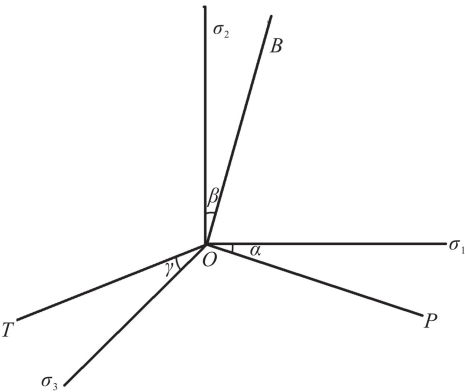


图 2 背景应力场 3 个主轴和震源机制 3 个应力轴夹角示意图
Fig.2 Included angles between 3 pincipal axes of background stress field and 3 stress axes of focal mechanism

复杂,使得该区地震的 P 轴展布也较分散。

表 2 和表 3 是各次震群中波形初动符号清晰的地震编号与震源机制一致性参数 θ 计算结果。图 4

是各震群序列的震源机制一致性参数及其 5 点滑动平均

平均值随时间变化情况,其中横坐标地震编号对应表 2 和表 3 中各震群序列中的地震。总体来看,

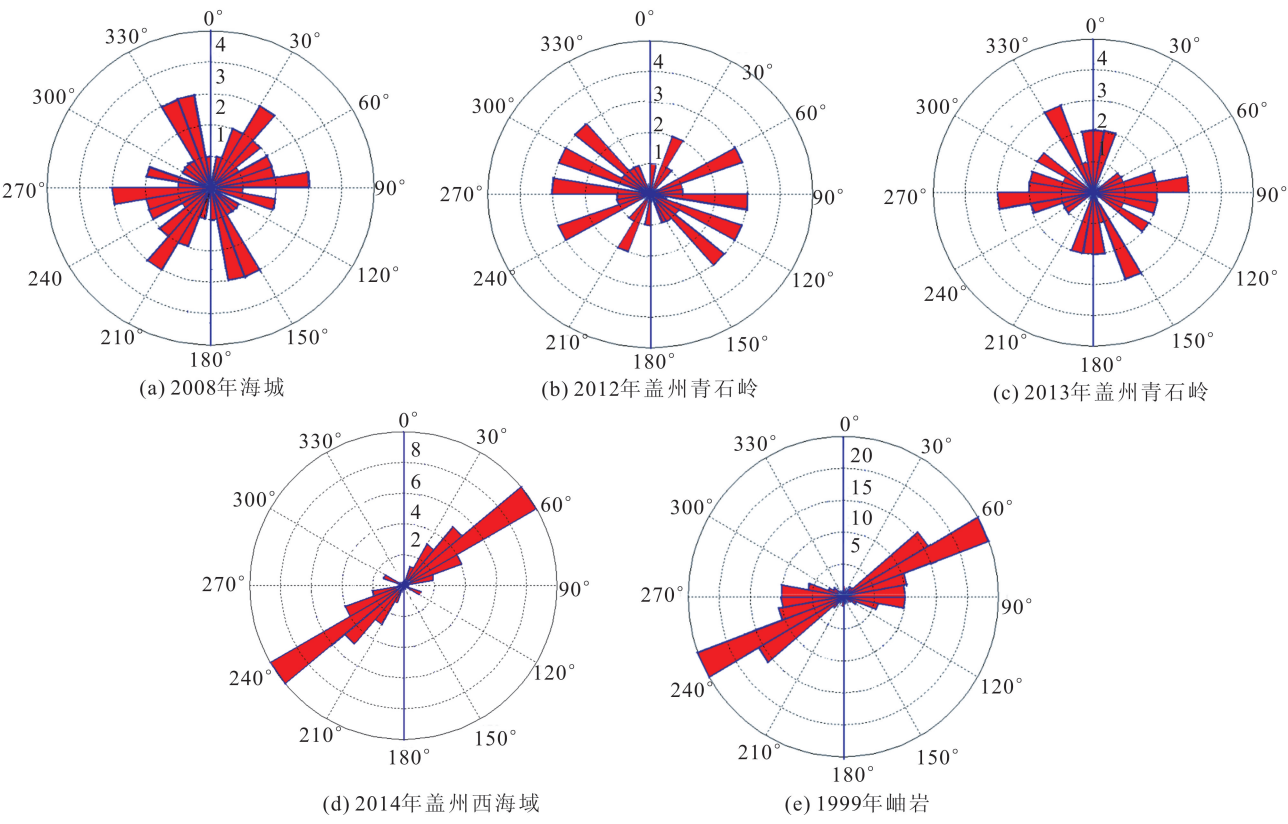


图 3 5 次震群的震源机制 P 轴每 10°归一频数分布图

Fig.3 Normalized frequency distribution of P-axis of focal mechanism of 5 earthquake swarms at intervals of 10°

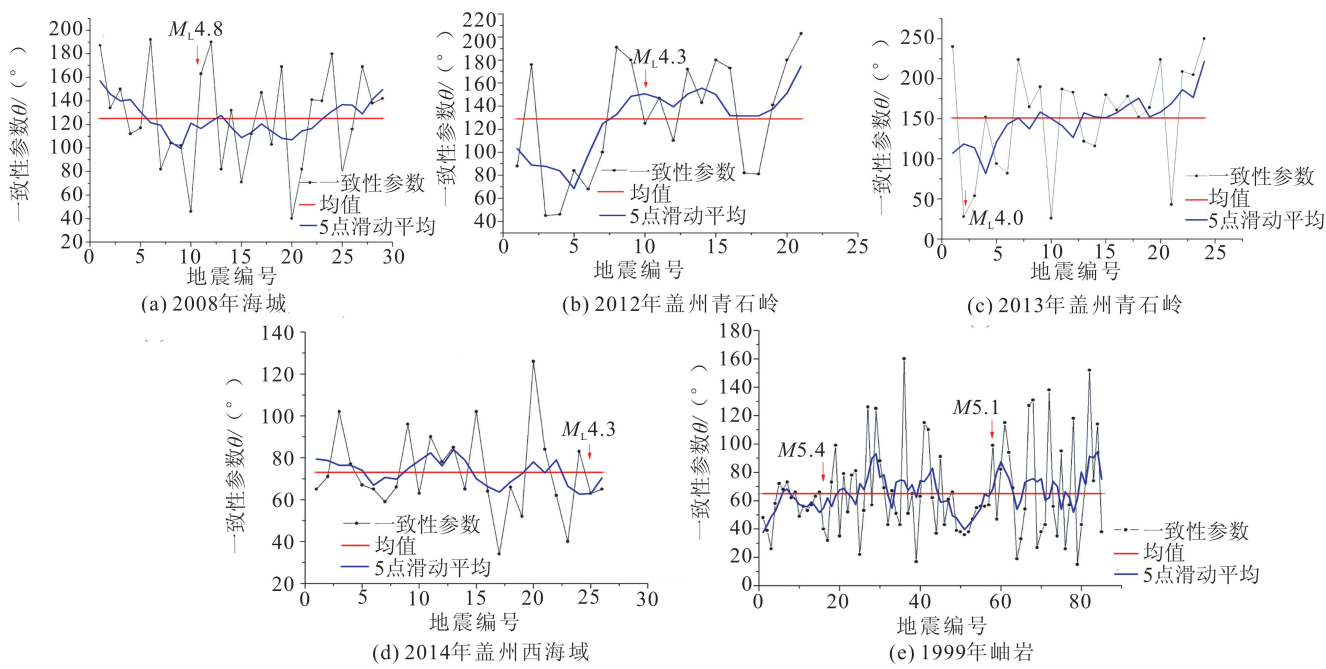


图 4 各震群序列的震源机制一致性参数随时间变化图

Fig.4 Variation of focal mechanism consistency parameters of each earthquake swarm with time

2008 年海城、2012 年青石岭和 2013 年盖州青石岭 3 次震群的震源机制一致性 θ 依次为 125° 、 129° 和 151° , 变化幅度较大(在 $40^{\circ}\sim 200^{\circ}$ 间变化), 均值都超过 12.5° , 而 5 点滑动平均值的范围 80% 以上在 $80^{\circ}\sim 160^{\circ}$ 之间[图 4(a)、图 4(b) 和图 4(c)]。而 2014 年盖州西海域震群和 1999 年岫岩地震序列的值变化幅度明显偏小, 大部分在 $20^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 间变化, 均值分别为 73° 和 65° , 5 点滑动平均值的范围 80%

以上在 $50^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 之间[图 4(d) 和图 4(e)]。值得注意的是, 除 2013 年盖州青石岭震群外[图 3(c)], 余下 4 个震群中较大地震发生前震源机制一致性参数 θ 值都有一个持续低于均值的过程, 例如 2008 年海城震群的低值从 2008 年 11 月 4 日开始, 直至 2008 年 11 月 14 日震群中发生最大 $M_L 4.8$ 地震, 持续时间 10 天[表 3、图 4(a)]; 2012 年青石岭震群的起始地震即为该震群的最大地

表 2 1999 年岫岩 5.4 地震序列的震源机制一致性参数计算结果

Table 2 The results of consistency parameters of focal mechanisms for the Xiuyan M5.4 earthquake sequence in 1999							
编号	时间	震级 M	一致性参数/ $(^{\circ})$	编号	时间	震级 M	一致性参数/ $(^{\circ})$
1	1999-11-09T7:01	4.1	48	44	1999-11-30T19:43	3.4	62
2	1999-11-09T7:07	4.2	39	45	1999-11-30T20:19	4.3	37
3	1999-11-09T17:44	3.6	26	46	1999-11-30T21:07	3.7	91
4	1999-11-16T18:57	3	58	47	1999-12-01T1:47	4.2	43
5	1999-11-25T0:59	3	72	48	1999-12-01T4:33	4.3	61
6	1999-11-25T20:47	4	68	49	1999-12-01T4:58	3.5	66
7	1999-11-25T20:55	4.4	73	50	1999-12-01T12:45	4.3	39
8	1999-11-25T21:17	3.5	62	51	1999-12-02T23:16	3.6	38
9	1999-11-25T22:08	3.2	66	52	1999-12-03T7:20	3.2	36
10	1999-11-25T23:19	3.2	49	53	1999-12-03T17:57	3.7	38
11	1999-11-26T23:34	4.4	56	54	1999-12-08T17:17	3	47
12	1999-11-26T23:36	3.1	53	55	1999-12-13T5:49	4.1	55
13	1999-11-27T15:48	3.2	57	56	1999-12-20T8:34	3.4	56
14	1999-11-28T8:15	3.3	63	57	1999-12-21T11:34	3.2	56
15	1999-11-29T5:56	3.2	66	58	1999-12-27T19:27	4	57
16	1999-11-29T12:10	5.9	40	59	1999-12-27T19:57	3.2	99
17	1999-11-29T12:18	3.6	32	60	1999-12-27T23:48	3.7	47
18	1999-11-29T12:23	3	73	61	2000-01-09T19:41	3.7	82
19	1999-11-29T12:28	3.2	99	62	2000-01-12T7:43	5.5	115
20	1999-11-29T12:45	5.1	35	63	2000-01-12T7:45	3.6	94
21	1999-11-29T13:03	3.4	79	64	2000-01-12T8:27	3.4	69
22	1999-11-29T13:05	3.4	52	65	2000-01-12T10:21	3.1	19
23	1999-11-29T13:12	3.4	78	66	2000-01-12T11:56	3.2	33
24	1999-11-29T14:55	3.3	81	67	2000-01-12T13:00	4.3	54
25	1999-11-29T15:12	3.6	22	68	2000-01-12T13:02	3.2	127
26	1999-11-29T16:16	5	53	69	2000-01-12T13:07	3	131
27	1999-11-29T16:20	3.1	126	70	2000-01-12T13:11	3.5	27
28	1999-11-29T16:43	3.2	57	71	2000-01-23T11:33	3.1	38
29	1999-11-29T19:09	3.3	125	72	2000-01-24T22:31	3.5	43
30	1999-11-29T22:29	3.2	88	73	2000-01-30T18:39	3.4	138
31	1999-11-29T23:54	3	69	74	2000-02-02T0:07	3.6	56
32	1999-11-30T0:29	3.2	43	75	2000-02-17T10:19	3	35
33	1999-11-30T7:52	4	67	76	2000-03-19T23:18	3.3	95
34	1999-11-30T10:08	3.5	51	77	2000-03-19T23:41	3.8	26
35	1999-11-30T13:58	5.2	43	78	2000-03-20T1:47	3	57
36	1999-11-30T14:02	3	160	79	2000-03-22T20:08	3.3	118
37	1999-11-30T14:06	4.9	51	80	2000-04-15T4:30	3.4	15
38	1999-11-30T14:09	4.3	65	81	2000-04-27T4:10	3.1	43
39	1999-11-30T14:30	3.4	17	82	2000-06-01T13:57	3.2	73
40	1999-11-30T14:35	3.3	63	83	2000-06-01T14:46	3.3	152
41	1999-11-30T15:27	3	115	84	2000-06-01T18:14	3	74
42	1999-11-30T17:40	3	110	85	2000-06-05T16:52	3.2	114
43				86	2000-07-19T7:55	3.6	38

表 3 海城和盖州地区震群的震源机制一致性参数计算结果

Table 3 The results of consistency parameters of focal mechanisms for earthquake swarms in Haicheng and Gaizhou area

编号	海城震群		一致性参数/(°)	盖州青石岭		一致性参数/(°)	盖州青石岭		一致性参数/(°)	盖州西海城		一致性参数/(°)
	时间	震级 M		时间	震级 M		时间	震级 M		时间	震级 M	
1	2008-11-03T2:55	4.1	187	2012-02-02T5:16	4.7	88	2013-03-30T8:19	3.2	240	2014-01-04T14:51	3.4	65
2	2008-11-03T8:24	2.6	134	2012-02-02T5:19	2.5	176	2013-03-30T14:05	4.0	28	2014-02-07T14:39	3.1	71
3	2008-11-03T12:38	2.6	150	2012-02-02T5:43	4.3	45	2013-03-30T14:06	2.9	54	2014-02-09T1:44	3.0	102
4	2008-11-4T11:56	2.7	112	2012-02-02T5:44	2.7	46	2013-03-30T14:10	2.7	152	2014-02-11T9:15	3.6	77
5	2008-11-09T0:46	4.0	117	2012-02-02T8:14	3.5	84	2013-03-30T15:16	2.9	94	2014-02-14T2:49	3.0	67
6	2008-11-09T1:55	2.8	192	2012-02-02T16:34	3.0	68	2013-03-31T12:53	3.9	82	2014-02-24T10:30	3.6	65
7	2008-11-11T2:06	3.5	82	2012-02-06T10:19	2.9	100	2013-04-16T0:45	3.8	224	2014-03-01T2:38	3.2	59
8	2008-11-11T2:14	2.5	104	2012-03-30T2:55	2.6	191	2013-04-16T0:46	2.6	165	2014-03-03T11:30	3.4	66
9	2008-11-11T2:27	3.0	102	2012-06-22T17:46	2.5	180	2013-04-16T10:57	2.7	190	2014-03-17T9:42	3.1	96
10	2008-11-11T7:25	3.4	46	2012-07-12T20:21	4.3	125	2013-04-23T0:21	3.4	26	2014-03-26T3:27	3.0	63
11	2008-11-14T6:53	4.8	163	2012-07-12T20:25	3.6	147	2013-04-23T1:54	2.3	187	2014-03-26T3:28	3.7	90
12	2008-11-14T9:15	2.5	190	2012-07-12T20:45	2.7	110	2013-04-24T1:37	3.2	183	2014-03-28T2:46	3.1	78
13	2008-11-28T14:29	2.6	82	2012-07-12T21:35	2.6	172	2013-04-24T2:07	3.1	122	2014-03-29T13:26	3.2	85
14	2008-12-04T11:09	2.8	132	2012-07-15T12:36	3.7	143	2013-04-24T3:45	3.7	116	2014-04-03T3:24	3.2	65
15	2008-12-04T11:46	2.8	71	2012-08-04T19:23	2.8	180	2013-04-24T3:52	3.0	180	2014-04-08T19:07	3.0	102
16	2009-01-01T13:46	4.2	112	2012-09-15T8:54	3.2	173	2013-04-24T4:41	2.5	161	2014-04-18T9:07	3.7	64
17	2009-01-10T22:39	2.8	147	2012-11-01T19:25	4.0	82	2013-04-24T5:36	2.8	178	2014-04-25T9:14	3.0	34
18	2009-01-12T3:38	2.6	103	2012-11-03T14:37	2.6	81	2013-04-24T10:53	2.5	152	2014-04-28T7:59	3.4	66
19	2009-01-13T16:15	3.1	169	2012-11-23T18:48	2.5	141	2013-04-24T11:02	2.4	164	2014-05-17T16:08	3.0	52
20	2009-01-14T10:35	3.9	40	2012-11-28T4:34	2.8	180	2013-04-24T12:15	2.6	224	2014-05-22T8:24	3.1	126
21	2009-02-02T15:14	3.4	82	2012-11-28T8:12	2.6	203	2013-04-24T15:36	3.0	43	2014-06-05T2:13	3.1	84
22	2009-02-14T16:34	2.9	141				2013-04-24T19:39	3.5	209	2014-06-10T7:44	3.0	62
23	2009-03-01T8:26	3.1	140				2013-04-26T0:17	2.5	205	2014-06-26T4:05	4.1	40
24	2009-03-08T20:33	2.7	180				2013-05-02T15:11	2.4	250	2014-07-04T11:02	3.0	83
25	2009-03-08T21:06	2.7	79							2014-08-22T7:54	4.3	63
26	2009-03-24T17:48	2.7	116							2014-09-28T11:12	3.3	65
27	2009-03-25T7:14	2.6	169									
28	2009-04-03T9:22	2.5	138									
29	2009-04-06T9:19	2.9	142									

震 $M_L4.7$,在 7 月 12 日震群中次大地震 $M_L4.3$ 发生之前, θ 值也有一个明显的持续低值时段,持时大约 2 个月[表 3、图 4(b)];2014 年盖州西海域震群中两次 4 级地震发生前 2 个月 θ 值也有一个明显的降低过程,即 2014 年 4 月 25 日 $M_L3.0$ 地震开始到 5 月 22 日 $M_L3.1$ 地震结束,持续时间约 1 个月[表 3、图 4(d)]。1999 年岫岩两次 5 级地震前, θ 值持续低值的现象最为明显,从 1999 年 11 月 9 日序列开始,到 11 月 29 日 $M5.4$ 主震发生前,这 20 天内的 θ 值均较低,5.4 级地震之后到 11 月 30 日, θ 值上下波动较大,或许说明此时震区的应力场正处于较大应力释放后的调整阶段。从 12 月 1 日开始至 12 月 27 日,一致性参数再次开始持续低值,且此时的 θ 值与前次高度接近,变化幅度在 20° 之内[表 2、图 4(e)]。由此可见,震群中较大地震发生前 10 天~2 个月,震源机制一致性参数都有一个低值的过程。1999 年岫岩前震序列的 θ 值变化幅度在 $20^\circ\sim$

30° 之间,且大部分小于 65° 。由此可见,震源机制和应力场的一致显示了构造应力场控制作用的增强,而一旦二者吻合度较好,可能意味着后续将有强震发生,例如 1999 年岫岩地震序列;反之,震源机制和应力场不一致,表明构造应力场控制作用减弱,地震将以离散发生中小地震为主,如 2008 年海城和 2012、2013、2014 年盖州几次震群。

若单从震源机制 P 轴取向较一致的角度判断震区应力场状态^[5],则 2014 年盖州西海域震群后续的发展演化就有些费解了。因为图 3(d)和图 3(e)显示 2014 年盖州西海域震群和 1999 年岫岩地震序列的 P 轴集中度相当,但是 2014 年的盖州震群和 2012 年、2013 年盖州青石岭震群一样,后续并没有更大地震发生。同样,从上述两次震群的 P 轴方位随地震发生次序变化中也可发现,尽管二者 P 轴方位的整体变化范围不大,表明应力场有一定的集中,但从时间角度看,震群或序列中较大地震前 P 轴方

位由紊乱趋于一致的异常显示并不明显(图 5)。然而从震源机制一致性参数 θ 的角度却可以明显看出二者的差别和较大地震发生前的持续低值现象[图 4(d)和图 4(e)]。可见相比用震源机制 P 轴取向趋于一致来判定震源区应力状态,震源机制一致性参数 θ 更具有优越性。

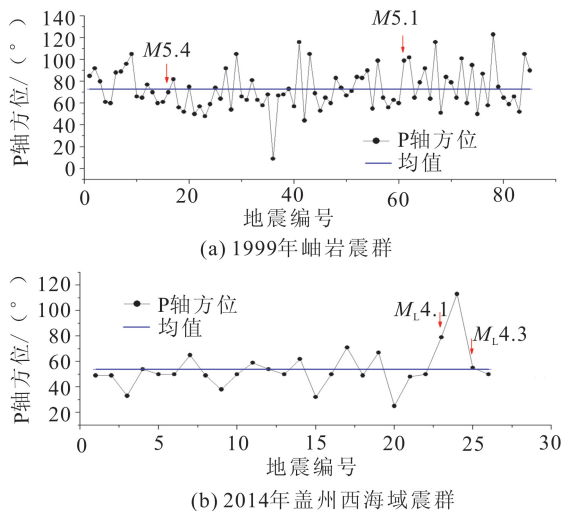


图 5 P 轴方位随地震发生次序变化图

Fig.5 Change of azimuth of P-axis with earthquake occurrence order

3 讨论与结论

有关强余震发生前震源机制一致性参数的低值现象,在大同、张北、秘鲁近海以及千岛岛弧震区的强余震震前出现过类似的现象^[8-10]。付虹等^[15]对云南地区强震前震源机制一致性参数的时空分布研究也发现,强震发生前 3 年至数月,震源区附近出现多个震源释放应力场与区域应力场一致或接近的中小地震,强震就发生在中小震震源机制一致性参数低值分布区内或其边缘附近。

陈颢^[7]根据多个强震震例的研究,提出地震震源机制一致性是判断地震危险性的一个有用判据的假说。任何一个地震序列都有发生、发展、衰退的过程,前震或在震群中最大地震发生之前,小震机制的相对一致性往往是地震活动性增强的标志,而机制的相对紊乱往往伴随着余震或地震群活动的减弱,因而从机制的一致性或紊乱可以判断震群中最大地震是否已经发生。本文的研究也表明:

(1) 将中小地震震源机制解 3 个正交的应力主轴与相应的区域构造应力场 3 个应力主轴在三维空间的夹角之和定义为震源机制一致性参数,是衡量地震震源释放应力场与区域构造应力场一致性程度

的定量指标。震源机制一致性参数 θ 值越小,则震源机制与区域应力场的一致性程度越高。中小地震震源机制与区域应力场一致性程度越高,表明区域构造应力场增强的趋势越明显,后续发生较大地震的可能性就越大。

(2) 营口—海城地区的震群中较大地震发生前 10 天~2 个月,震源机制一致性参数都有一个低值的过程,低值的持续时间和波动范围或许与震群的性质有关。普通震群(如 2008 年海城、2012 年和 2013 年盖州青石岭)一致性参数的波动范围较大,且一致性参数的均值均超过 125° [图 4(a)、图 4(b)、图 4(c)]。而 1999 年岫岩前震序列中两次较大地震(1999 年 11 月 29 日 M5.4 和 2000 年 1 月 12 日 M5.1)前的 θ 值持续较低,变化幅度大部分在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间,且大部分小于均值 65° 。尽管 2014 年盖州西海域震群一致性参数的波动范围不大,均值也不高(73°),说明该区的应力场有一定的增强趋势,但是鉴于其一致性参数没有出现持续低值的现象[图 4(d)],有待后续进一步跟踪研究。

(3) 相比用震源机制 P 轴取向趋于一致来判定震源区应力状态,震源机制一致性参数更有其优越性。由于样本数量的局限性和震源机制计算的误差,本文的研究结果有待进一步检验。相信随着不同区域不同强度震例研究样本的积累,该方法在强余震预测和前震序列识别上的预测意义将愈来愈明显。

参考文献(References)

- [1] 郭祥云,陈学忠,王生文,等.川滇地区中小地震震源机制解及构造应力场的研究[J].地震工程学报,2014,36(3):599-607.
GUO Xiang-yun, CHEN Xue-zhong, WANG Sheng-wen, et al. Focal Mechanism of Small and Moderate Earthquakes and Tectonic Stress Field in Sichuan—Yunnan Areas[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(3): 599-607. (in Chinese)
- [2] 倪红玉,刘泽民,何康.祁连山断裂带安徽段中小地震震源机制及现代应力场特征[J].地震工程学报,2013,35(3):677-683.
NI Hong-yu, LIU Ze-min, HE Kang. Study on Focal Mechanisms of Moderate-small Earthquakes and Characteristics of Recent Tectonic Stress Field in the Anhui Sector of Tanlu Fault Zone[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(3): 677-683. (in Chinese)
- [3] 王熠熙,张辉.利用多个震源机制解求祁连山西段平均应力场方向[J].地震工程学报,2013,35(2):289-295.
WANG Yi-xi, ZHANG Hui. Determination of the Direction of the Mean Stress Field in the Western Qilian Mountains through Focal Mechanism Solution Analysis[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35(2): 289-295. (in Chinese)

- [4] 张萍,李芳,于笑非,等.海城附近4个震群地震活动特征的对比研究[J].防灾减灾学报,2012,28(3):17-25.
ZHANG Ping, LI Fang, YU Xiao-fei, et al. Comparative Study on Seismicity Characteristics of Four Earthquake Swarms near Haicheng[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2012, 28(3): 17-25. (in Chinese)
- [5] 张萍,蒋秀琴.岫岩—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,2001,22(2):76-82.
ZHANG Ping, JIANG Xiu-qin. 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, 2001, 22(2): 76-82. (in Chinese)
- [6] 张萍,于龙伟,李涯,等.岫岩—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,2003,24(1):29-38.
ZHANG Ping, YU Long-wei, LI Ya, et al. 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, 2003, 24(1): 29-38. (in Chinese)
- [7] 陈颢.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,1978,19(2):142-159.
CHEN Yong. Consistency of Focal Mechanism as a New Parameter in Describing Seismic Activity [J]. Acta Geophysica Sinica, 1978, 19(2): 142-159. (in Chinese)
- [8] 刁桂苓,赵英萍,啜永清,等.大同晚期强余震前震源机制解的一致性特征[J].内陆地震,2004,18(3):202-206.
DIAO Gui-ling, ZHAO Ying-ping, CHUO Yong-qing, et al. Coherence Characteristics of Focal Mechanism Solutions of Later-period Strong After Shocks [J]. Inland Earthquake, 2004, 18(30): 202-206. (in Chinese)
- [9] 赵英萍,刁桂苓,高景春,等.张北强余震前震源机制解的一致性特征[J].华北地震科学,2004,22(1):1-4.
ZHAO Ying-ping, DIAO Gui-ling, GAO Jing-chun, et al. Consistency of the Focal Mechanisms before Some Strong After-shocks in Zhangbei Earthquake Series [J]. North China Earthquake Sciences, 2004, 22(1): 1-4. (in Chinese)
- [10] 泽仁志玛,刁桂苓,李志雄,等.大震前显示的地震震源机制趋于一致的变化[J].地震,2010,30(1):108-114.
ZE REN Zhi-ma, DIAO Gui-ling, LI Zhi-xiong, et al. Consistent Distribution of Stress before Strong Earthquake from Focal Mechanisms [J]. Earthquake, 2010, 30(1): 108-114. (in Chinese)
- [11] 曹凤娟,翟丽娜,殷铁娜,等.辽宁地区震群序列统计特征及预报意义研究[J].中国地震,2015,31(1):45-55.
CAO Feng-juan, ZHAI Li-na, YIN Yi-na, et al. The Study on the Statistical Characteristics of the Earthquake Swarms in Liaoning and the Prediction Significance [J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(1): 45-55. (in Chinese)
- [12] 许忠淮,阎明,赵仲和.由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向[J].地震学报,1983,5(3):268-279.
XU Zhong-huai, YAN Ming, ZHAO Zhong-he. Evaluation of the Direction of Tectonic Stress in North China from Recorded Data of a Large Number of Small Earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 1983, 5(3): 268-279. (in Chinese)
- [13] 许忠淮.东亚地区现今构造应力图的编制[J].地震学报,2001,23(5):492-501.
XU Zhong-huai. A Present-day Tectonic Stress Map for Eastern Asia Region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2001, 23(5): 491-501. (in Chinese)
- [14] 汪素云,许忠淮.中国东部大陆的地震构造应力场[J].地震学报,1985,7(1):17-32.
WANG Su-yun, XU Zhong-huai. Seismo-tectonic Stress Field in East China [J]. 1985, 7(1): 17-32. (in Chinese)
- [15] 付虹,王绍晋,李丽,等.滇中地区震源机制一致性参数时空分布与强震活动[J].地震研究,2011,34(2):113-118.
FU Hong, WANG Shao-jin, LI Li, et al. Spatial-temporal Distribution of the Parameters of the Focal Mechanism and Strong Seismicity in Central Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 2011, 34(2): 113-118. (in Chinese)