

戴盈磊, 李子昊, 李林侗, 等. 基于构造应力场的震源机制解发震断层面识别——以辽宁海城、营口及周边地区为例[J]. 华南地震, 2024, 44(4): 11–20. [DAI Yinglei, LI Zihao, LI Lintong, et al. Identification of Seismogenic Fault Plane of Focal Mechanism Solutions Based on Tectonic Stress Fields: A Case study of Haicheng and Yingkou of Liaoning Province and Their Surrounding Areas[J]. South China journal of seismology, 2024, 44(4): 11–20]

基于构造应力场的震源机制解发震断层面识别 ——以辽宁海城、营口及周边地区为例

戴盈磊, 李子昊, 李林侗, 刘霖婷, 侯作亮

(辽宁省地震局, 沈阳 110034)

摘要: 为探讨基于构造应力场的震源机制解发震断层面识别方法在辽宁地区的适用性。采用P波初动方法计算并收集了辽宁地区253个震源机制解。参照震源机制水平应变花面应变对其进行分类。在反演震源区构造应力场的同时, 给出判定的震源机制解发震断层面。结果表明: 辽宁地区的地震多为走滑型和正断型。构造应力场最大主应力优势分布方位为NEE向, 倾伏角多为水平或近直立; 中间主应力方位离散, 倾伏角较陡; 最小主应力以NNW向为主, 倾伏角较小; 总体上属于张应力占主导的走滑应力体系。识别出195个震源机制解发震断层面符合主要发震控震构造特征及安德森断层形成力学理论。对于中强地震准确性显著, 对于小震也能保证一定的可靠性。证明在辽宁地区应用该方法可行的。

关键词: 震源机制解; 构造应力场; 断层不稳定系数; 发震断层; 辽宁地区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2024)04-0011-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2024.04.02

Identification of Seismogenic Fault Plane of Focal Mechanism Solutions Based on Tectonic Stress Fields: A Case study of Haicheng and Yingkou of Liaoning Province and Their Surrounding Areas

DAI Yinglei, LI Zihao, LI Lintong, LIU Linting, HOU Zuoliang

(Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, China)

Abstract: In order to explore the applicability of the identification method of seismogenic fault plane of focal mechanism solutions based on the tectonic stress field in Liaoning area, the P-wave first motion method was used to calculate and collect 253 focal mechanism solutions in Liaoning area. They were classified according to the areal strain of the horizontal strain rosette of the focal mechanism. While inverting the tectonic stress field in the source area, the determined seismogenic fault plane of focal mechanism solutions was given. The results show that earthquakes in Liaoning area are mostly strike-slip and normal faults. The dominant distribution direction of the

收稿日期: 2024-02-26

基金项目: 辽宁省地震局预研孵化基金项目(LZ2022001); 中国地震局地震应急青年重点任务(CEA_EDEM-20240203); 中国地震局地震科技星火计划项目(XH24009YA)联合资助。

作者简介: 戴盈磊(1983-), 男, 工程师, 主要从事大地构造与地球动力学研究, 地震应急等工作。

E-mail: handsomedyl@163.com

maximum principal stress in the tectonic stress field is NEE, and the dip angle is mostly horizontal or nearly vertical. The orientation of intermediate principal stress is discrete, and the dip angle is steep. The minimum principal stress is mainly in the NNW direction, and the dip angle is small. In general, it belongs to a strike-slip stress system dominated by tensile stress. The identified 195 seismogenic fault planes of focal mechanism solutions are consistent with the characteristics of main seismic control structures and Anderson fault theory. The accuracy is remarkable for intermediate and strong earthquakes, and there is also certain reliability for small earthquakes. This paper proves that the application of this method in Liaoning is feasible.

Keywords: Focal mechanism solution; Tectonic stress field; Fault instability coefficient; Seismogenic fault; Liaoning area

0 引言

震源机制解又称断层面解,在一定层面上阐释了发震断层错动的几何特征和运动过程^[1]。对地震孕育和发生机理研究、震后趋势研判、震害损失评估,地震应急救援等工作具有重要意义。许英才^[2]测定了2023年沙雅 $M_s6.1$ 地震和2021年洛浦 $M_s6.0$ 地震的矩张量解,据此讨论了2两次地震破裂过程的异同;王润妍等^[3]在确定出2023年石积山6.2级地震震源机制中心解的基础上,计算了该地震对周边地区产生的同震位移场及形变场;徐志双等^[4]经评估,认为以震源机制解走向作为影响场长轴方向是可行的。因此,如何快速、准确地从划分压缩和膨胀象限的2个节面中识别发震断层面至为关键^[5,6]。通常,判定发震断层面的主要依据有3类:一是野外现场地质调查,这是最为直接有效的方法;二是基于大地测量学观测数据给出破裂方向;三是对地震学资料进行分析,如余震的空间分布特征。2013年Vavryčuk等^[7]在对克里特岛中部和西波希米亚地区的463个地震震源机制解进行分析的过程中,提出断层不稳定系数,并用于构造应力场反演的同时,正确给出震源机制解的发震断层面^[8]。与以上传统判定方法相比,该方法只需准备重点研究区的震源机制解和构造应力场数据库。盛书中等^[9]将这一方法应用于云南盈江地区,对5次中强地震及小震断层面识别结果进行深入分析和讨论,获得了可靠的结果。

辽宁地区(118.6°~126°E, 38.4°~43.8°N)构造背景上处在总体走向呈北东向的华北断块北部,喜马拉雅运动形成了境内东西部隆起和中部拗陷的格局,地质构造复杂。是中国大陆东部地震活动相对活跃的地区之一^[10]。自1970年有小震记录以来辽宁及邻区共发生 $M \geq 5.0$ 地震7次(不包括余震)^[11],

其中,省内的有1975年海城7.3级地震、1999年岫岩5.4级地震和2013年灯塔5.1级地震,多位学者对以上震例进行了研究^[12-14]。且已有关于中国大陆内部发震构造运动特征的研究发现,华北地震区5级以上地震一般具有较明确的构造背景^[15]。

为了论证将上述震源机制解发震断层面识别方法应用于辽宁地区的可行性和有效性。本文拟收集并计算辽宁及邻区的震源机制解资料,对其发震断层面进行判定,综合前人的成果资料探讨单个典型震例与整体识别结果的可靠程度。以期为该地区今后基于震源机制解的相关研究和工作提供科学参考。

1 方法和数据

1.1 研究方法

本文使用Vavryčuk等^[7]根据库伦—莫尔破裂准则而提出的断层不稳定系数 I 来甄别震源机制解2个节面中的发震断层面。 I 值最小为0对应最稳定断层面,最大为1对应最易发生滑动断层面。断层不稳定系数 I 可表示为^[8]:

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - \sigma_1)}{\tau_c - \mu(\sigma_c - \sigma_1)} \quad (1)$$

式(1)中, τ_c , σ_c 是发震断层面的剪切应力和有效正应力(如图1中红色圆点); τ , σ 是待求解断层面的剪切应力及有效正应力(图1中黑色圆点)。式(1)中的断层不稳定系数 I 独立于应力的绝对大小,只与摩擦系数 μ 、应力形因子 R 以及断层面法向 n 在主轴坐标系中的方向余弦有关。假设3个主应力分别为:

$$\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 1 - 2R, \sigma_3 = -1 \quad (2)$$

式(2)中的3个主应力以压缩为正,应力形因子 R

定义如下：

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1 - \sigma_3} \tag{3}$$

发震断层面的剪切应力和有效正应力 τ_c , σ_c 可根据库伦破裂准则得到, 即：

$$\tau_c = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \tag{4}$$

$$\sigma_c = -\frac{\mu}{\sqrt{1 + \mu^2}} \tag{5}$$

将式(4)、(5)代入式(1)：

$$I = \frac{\tau - \mu(\sigma - 1)}{\mu + \sqrt{1 + \mu^2}} \tag{6}$$

其中：

$$\sigma = n_1^2 + (1 - 2R)n_2^2 - n_3^2 \tag{7}$$

$$\tau = \sqrt{n_1^2 + (1 - 2R)^2 n_2^2 + n_3^2 - [n_1^2 + (1 - 2R)n_2^2 - n_3^2]^2} \tag{8}$$

通过式(6)、(7)和(8)可知, 摩擦系数 μ 、应力形因子 R 和 3 个主应力方位与断层面法向 n 在应力主轴坐标系中的方向余弦共同约束了断层不稳定系数 I 。而计算震源区构造应力场可获得 μ 、 R 及 3 个主应力方向。

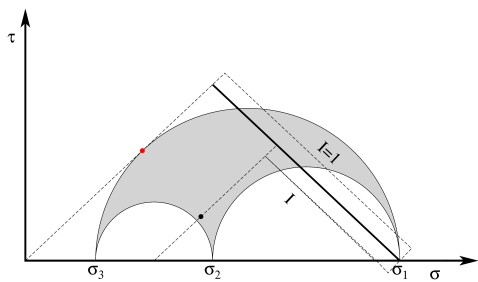


图1 断层不稳定系数的莫尔圆示意图

Fig.1 Definition of the fault instability in Mohr's diagram

1.2 震源机制解数据

本文对辽宁地区 2001 年 1 月 1 日至 2022 年 12

月 31 日的震源机制解资料进行发震断层面识别, 也包括海城^[16]、岫岩^[13], 和灯塔^[14]3 次 5 级以上地震的震源机制。其中 2001 年至 2007 年的资料从国家地震科学数据共享中心 (<http://data.earthquake.cn/>) 获取；2008 年至 2015 年 $M_L \geq 3.0$ 及以上地震的震源机制来自王岩等^[17]采用 P 波初动方法给出的结果；2010—2014 年 $M_L 2.5 \sim M_L 3.0$ 的震源机制资料来自林向东等^[18]通过 FOCMEC 方法求解的结果；几次 $M_L \geq 4.5$ 地震的震源机制分别由张博等^[19], 苏培臻等^[20]使用 CAP 方法计算得到。此外, 2016—2022 年 $M_L \geq 3.0$ 级地震震源机制本文根据戴盈磊等^[21]反演的辽宁地区最小一维 P 波速度模型(表 1), 基于 P 波初动极性方法^[22]进行计算, 保证每个地震至少有 15 个初动极性符号, 具体结果参数列于表 2。

从表 2 可知, 矛盾比为 0.00 的计算结果有 6 个, 占到总数的 12%；矛盾比在 0.00~0.10 之间的震源机制解 15 个, 占 30%；矛盾比介于 0.10~0.20 的结果 18 个, 占 36%；高于 0.20 的 11 个, 占 22%。

表 1 辽宁地区最小一维 P 波速度模型

Table 1 Minimum 1D P-wave velocity model in Liaoning area

序号	层顶深度/km	P 波速度/(km·s ⁻¹)
1	-1.0	5.74
2	0.0	5.92
3	5.0	5.93
4	10.0	6.04
5	15.0	6.17
6	20.0	6.25
7	25.0	6.28
8	30.0	6.38
9	35.0	6.42

表 2 基于 P 波初动极性求解的辽宁地区 2016—2022 年 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解

Table 2 Focal mechanism solution of earthquakes with $M_L \geq 3.0$ in Liaoning area from 2016 to 2022 based on P-wave first motion polarity

序号	发震日期/ (年-月-日)	经度/(°E)	纬度/ (°N)	震级/ (M_L)	参考地点	走向/(°)	倾伏角/ (°)	滑动角/ (°)	矛盾比	初动 符号数
1	2016-01-04	123.94	41.85	3.0	抚顺	141.12	83.28	-161.12	0.21	19
2	2016-07-03	122.63	40.70	3.4	大石桥	49.69	72.77	-121.57	0.06	18
3	2016-10-29	119.75	41.33	4.3	喀左	58.83	61.98	-112.8	0.15	20

(转下表)

(接表2)

序号	发震日期/ (年-月-日)	经度/(°E)	纬度/ (°N)	震级/ (M_L)	参考地点	走向/(°)	倾伏角/ (°)	滑动角/ (°)	矛盾比	初动 符号数
4	2017-01-17	121.36	41.36	3.2	义县	60.15	80.15	-178.25	0.06	16
5	2017-03-04	122.50	42.06	3.4	新民	207.69	83.59	140.43	0.11	19
6	2017-07-08	122.93	41.52	3.0	辽中	10.15	88.27	-170.15	0.11	18
7	2017-09-07	122.19	40.31	3.5	盖州海域	66.38	70.32	-100.63	0.00	20
8	2017-10-19	124.58	41.99	3.6	清原	243.00	56.17	157.24	0.09	22
9	2017-11-11	123.21	41.50	3.1	灯塔	180.00	50.00	90.00	0.06	18
10	2017-11-14	122.82	40.66	3.0	海城	190.00	90.00	0.02	0.12	17
11	2017-12-19	123.04	40.53	4.8	岫岩	219.69	72.77	-121.57	0.06	36
12	2018-02-17	123.48	42.52	3.0	法库	198.24	74.81	166.83	0.06	17
13	2018-02-21	122.83	40.65	3.2	海城	138.34	60.5	137.61	0.11	19
14	2018-03-01	122.17	39.42	3.1	普兰店	210	80	179.98	0.00	17
15	2018-04-10	119.92	42.33	4.0	敖汉旗	244.49	22.27	-117.27	0.13	15
16	2018-04-23	122.14	43.31	3.5	科尔沁左翼后旗	232.76	56.17	127	0.24	21
17	2019-02-01	120.54	42.19	3.6	敖汉旗	210	90	90	0.13	15
18	2019-03-20	123.05	40.53	3.5	岫岩	43.99	52.84	-115.41	0.06	16
19	2019-04-27	121.02	41.60	3.8	义县	66.55	80.61	-110.28	0.11	28
20	2019-05-05	124.17	41.60	3.4	抚顺县	67.27	22.27	-154.49	0.16	19
21	2019-05-30	123.41	39.66	3.2	庄河海域	233.99	52.84	-115.41	0.22	18
22	2019-06-09	119.89	42.02	3.9	建平	241.71	50.73	-102.96	0.32	19
23	2019-07-13	122.88	40.67	3.4	海城	358.43	72.77	169.69	0.08	24
24	2019-11-04	122.65	40.70	3.8	海城	246.05	35.53	-149.36	0.12	25
25	2019-11-24	122.37	40.52	3.1	营口	160	90	90	0.29	17
26	2019-11-25	122.42	40.48	3.2	盖州	10	60	-90	0.00	16
27	2019-12-28	122.92	40.64	3.1	盖州	60	80	-90	0.06	18
28	2020-01-08	122.68	40.70	3.5	海城	214.49	22.27	-117.27	0.14	22
29	2020-01-17	122.70	40.69	3.1	海城	345.44	14.11	-135.44	0.24	21
30	2020-08-19	123.94	41.87	3.5	抚顺	178.25	80.15	-100.15	0.28	29
31	2020-09-09	122.29	40.47	3.6	营口	63.26	31.47	-109.43	0.15	26
32	2020-09-15	122.30	40.49	3.2	营口	94.56	14.11	135.44	0.28	25
33	2020-09-19	122.28	40.48	3.7	营口	227.24	56.17	-127	0.12	17
34	2020-11-01	123.19	41.03	3.6	鞍山	216.14	71.25	-143.99	0.06	16
35	2020-11-09	122.66	40.69	3.4	海城	236.38	70.32	-100.63	0.11	19
36	2020-12-05	122.31	40.47	3.2	营口	21.57	72.77	-169.69	0.00	16
37	2020-12-18	122.29	40.47	3.5	营口	19.72	80.61	176.55	0.06	18
38	2021-01-11	123.13	42.59	4.1	康平	290	90	90	0.22	32
39	2021-01-17	123.06	40.52	3.6	岫岩	210.15	88.27	-170.15	0.00	16
40	2021-07-23	123.06	40.53	3.2	海城	160	90	90	0.12	16
41	2021-07-23	122.16	43.01	3.5	科左后旗	278.25	80.15	-100.15	0.05	20

(转下表)

(接表2)

序号	发震日期/ (年-月-日)	经度/(°E)	纬度/ (°N)	震级/ (M_L)	参考地点	走向/(°)	倾伏角/ (°)	滑动角/ (°)	矛盾比	初动 符号数
42	2021-07-27	122.84	40.66	3.2	海城	20	60	180	0.00	15
43	2021-10-12	123.06	40.54	3.8	岫岩	258.25	80.15	-100.15	0.12	34
44	2022-07-10	120.66	38.65	3.6	旅顺海域	220	10	179.98	0.20	20
45	2022-08-21	120.63	38.61	3.5	旅顺海域	62.73	65.6	147.27	0.25	16
46	2022-08-31	122.82	40.66	3.2	海城	23.53	82.36	-130.43	0.04	23
47	2022-09-19	122.23	40.45	3.6	盖州海域	261.66	60.5	-137.61	0.08	25
48	2022-09-23	122.23	40.44	3.5	盖州海域	254.96	81.35	-120.38	0.09	22
49	2022-10-13	125.68	41.57	3.3	通化	274.66	41.03	168.31	0.27	30
50	2022-10-30	119.94	38.78	4.4	渤海	83.99	52.84	-115.41	0.20	25

万永革^[23]提出了将地震震源机制水平应变花理论的面应变(A_s)作为震源机制类型划分的标准。正断型： $-1\leq A_s<-0.7$ ；正走滑型： $-0.7\leq A_s<-0.3$ ；走滑型： $-0.3\leq A_s\leq 0.3$ ；逆走滑型： $0.3<A_s\leq 0.7$ ；逆断型： $0.7<A_s\leq 1$ 。避免了由于不确定型震源机制的存在给后续分析造成的困难。整理上述震源机制解数据共计253个，参照该方法进行分类(如图2)。其中，正断型(NF)地震有51个，占总体数量的20.16%；正走滑型(NS)地震29个，占总数的11.46%；走滑型(SS)地震有122个，占总数的48.22%；逆走滑型(RS)地震20个，占总数的7.91%；逆断型(RF)地震31个，占总数的12.25%。可见，辽宁地区的地震活动以走滑和正断类型为主，具体分布情况如图3。

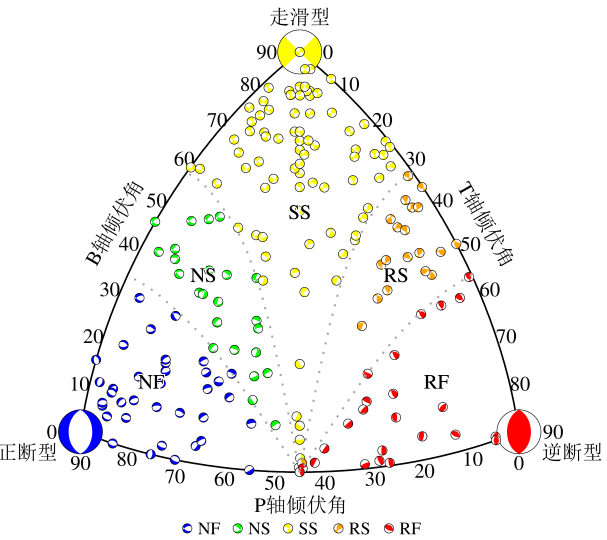
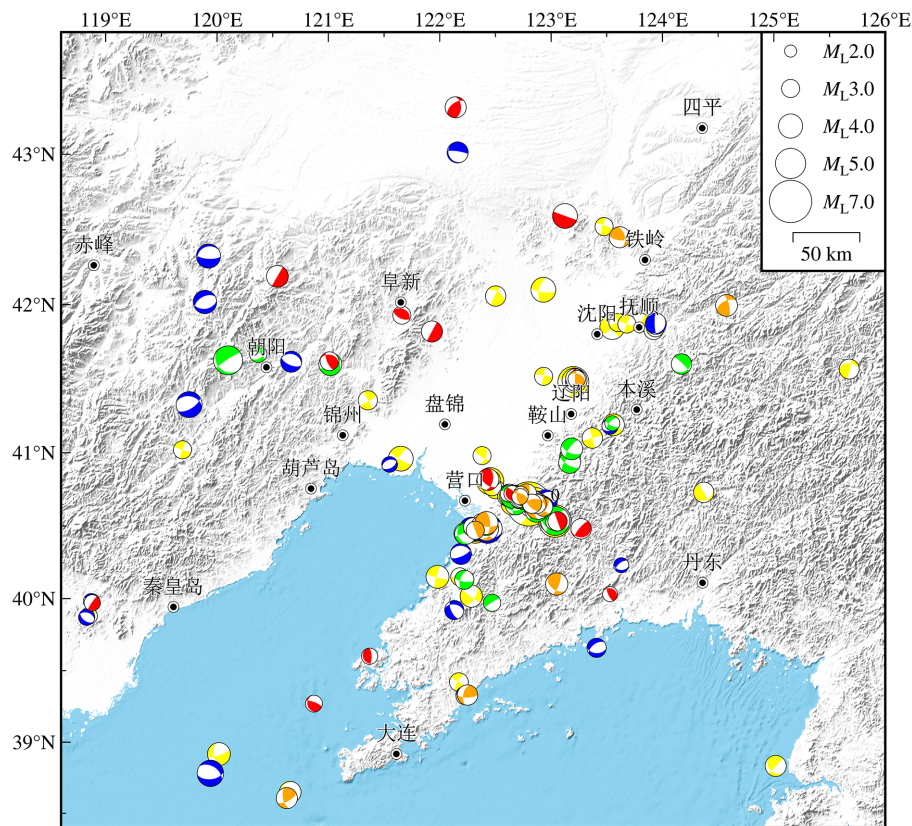


图2 辽宁地区震源机制类型划分
Fig.2 Division of focal mechanism types in Liaoning area

2 计算结果与分析

2.1 计算结果

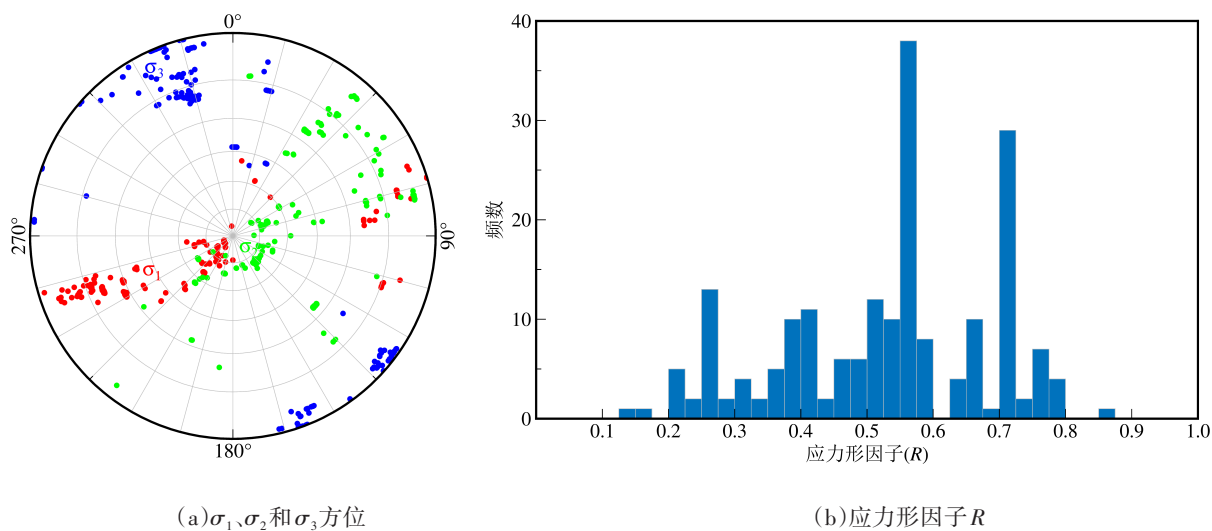
已有的研究^[24-26]表明，辽宁地区的地震活动性和构造应力场呈现明显的不均匀特征。因此，本文参考盛书中等^[9]在云南盈江地区反演各地震附近构造应力场的研究思路，并经过试算对比，分别以每个震源机制为网格中心，当震中距25 km范围内震源机制数量至少有6个时，计算该震源处的构造应力场，最多使用35个震源机制数据。若该范围内震源机制数量大于35，则选取距离最近的35个震源机制进行反演计算。此外，为了保证识别到全部 $M_L4.5$ 及以上地震震源机制的发震断层面，将2016年5月22日朝阳 $M_L4.8$ 地震的构造应力场反演震中距单独设置为100 km。在全部253个震源机制解中，共得到196个震源处的构造应力场(如图4)。由图4(a)可知，各震源区最大主应力 σ_1 方位以NEE向为主，倾伏角主要集中在水平和近直立2个区间内。戴盈磊等^[24]使用网格搜索方法给出了辽宁地区3个地质构造单元的构造应力场特征。其中，辽西隆起和胶辽台隆的最大主应力倾伏角较陡，华北断坳的最大主应力倾伏角较为水平，本文结果与此相近。中间主应力 σ_2 的方位分布相对分散一些，倾伏角多数较陡。最小主应力 σ_3 的优势方位为NNW向，有个别近NS向，其倾伏角大多小于 σ_1 。根据3个主应力的方位和倾伏角及图4(b)中的应力形因子 R 主要分布于0.5~0.8之间判断，辽宁地区的构造应力场属于走滑类型，且整体上处于拉张的应力状态。该计算结果与戴盈磊等^[25-26]先后使用不同数据和方法的研究结果一致。



注:不同颜色代表的震源机制类型与图2一致。

图3 各类型震源机制空间分布

Fig.3 Spatial distribution of various focal mechanisms



(a) σ_1 、 σ_2 和 σ_3 方位

(b) 应力形因子 R

图4 每个震源处的构造应力场反演结果

Fig.4 Inversion results of tectonic stress field at each source

根据以上震源机制数据和构造应力场结果,采用 Vavryčuk^[6]的方法计算各震源机制解2个节面上的不稳定系数,将其相对较大的节面判定为发

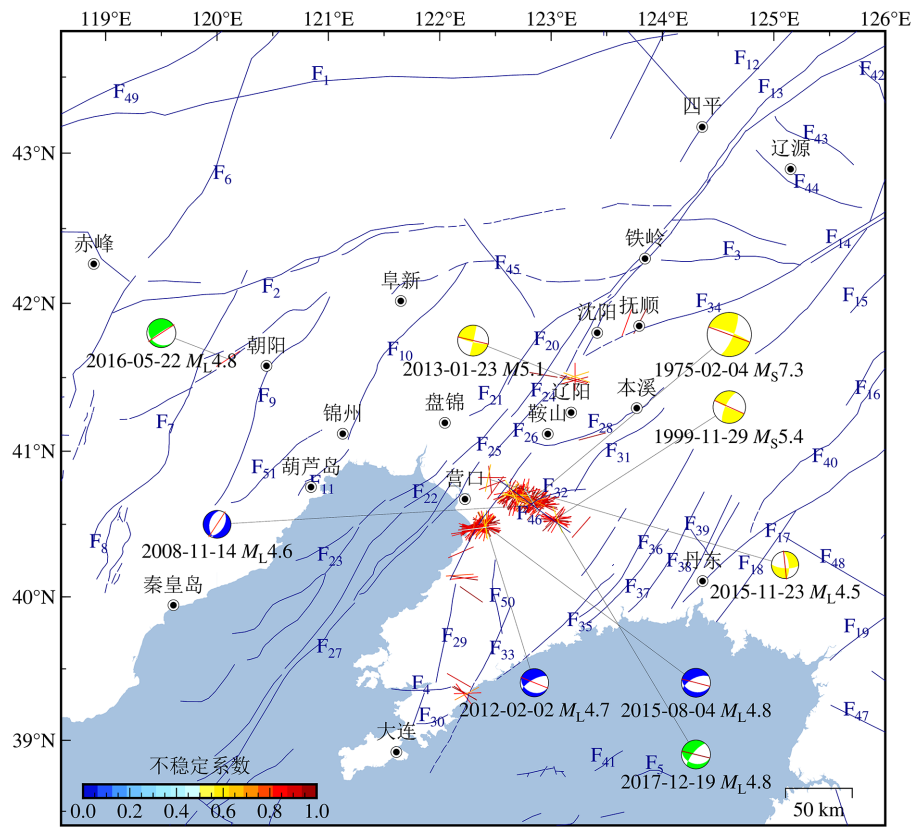
震断层面,所得结果见表3和图5。对选定的196个震源机制解发震断层面走向和倾伏角进行统计,具体结果如图6。

表3 辽宁地区 $M_L \geq 4.5$ 地震震源机制节面不稳定系数计算结果

Table 3 Results of plane instability coefficient of focal mechanism of earthquakes with $M_L \geq 4.5$ in Liaoning area

序号	发震日期/ (年-月-日)	经度 $/(^{\circ}\text{E})$	纬度 $/(^{\circ}\text{N})$	震级	震中位置	节面 I $/(^{\circ})$	节面 II $/(^{\circ})$	摩擦系数 μ	不稳定系数/(I)
						走向/倾角/滑动角	走向/倾角/滑动角		节面 I /节面 II
1	1975-02-04	122.80	40.65	7.3	海城	22.80/74.85/-170.24	290.23/80.58/-15.36	0.54	0.599 3/0.902 2
2	1999-11-29	123.03	40.53	5.4	岫岩	114.25/85.77/-19.48	205.75/70.58/-175.51	1.00	0.896 9/0.645 5
3	2008-11-14	122.91	40.63	4.6	海城	33/48/-75	191/44/-106	0.53	0.786 1/0.738 8
4	2012-02-02	122.42	40.48	4.7	盖州	112/30/-43	241/70/-113	0.72	0.867 7/0.765 4
5	2013-01-23	123.20	41.48	5.1	灯塔	13.16/88.64/171.01	103.38/81.01/1.37	1.00	0.846 4/0.903 5
6	2015-08-04	122.43	40.48	4.8	盖州	105/35/-55	244/62/-112	0.72	0.878 8/0.701 3
7	2015-11-23	122.45	40.81	4.5	大石桥	93/70/-155	354/67/-22	0.74	0.739 1/0.886 8
8	2016-05-22	120.10	41.63	4.8	朝阳	130/22/-18	237/83/-111	0.74	0.528 9/0.869 9
9	2017-12-19	123.04	40.53	4.8	岫岩	103.95/35.53/-30.64	219.60/72.77/-121.57	0.51	0.999 4/0.527 0

*注:1号,2号,5号的震级为 M_S ,其他震级为 M_L 。



(F_2 赤峰—开原断裂; F_7 中三家子断裂; F_9 朝阳—北票断裂; F_{10} 医巫闾山西侧断裂; F_{13} 依兰—伊通断裂; F_{14} 敦化—密山断裂; F_{21} 台安断裂;
 F_{24} 辽中断裂; F_{26} 营口—佟二堡断裂; F_{28} 太子河断裂; F_{29} 金州断裂; F_{32} 析木城—胡家岭断裂; F_{34} 浑河断裂; F_{46} 海城河断裂)
不同颜色代表的震源机制类型与图2一致。

图5 发震断层走向和断层不稳定系数分布图

Fig.5 Seismogenic fault plane orientation and fault instability coefficient distribution

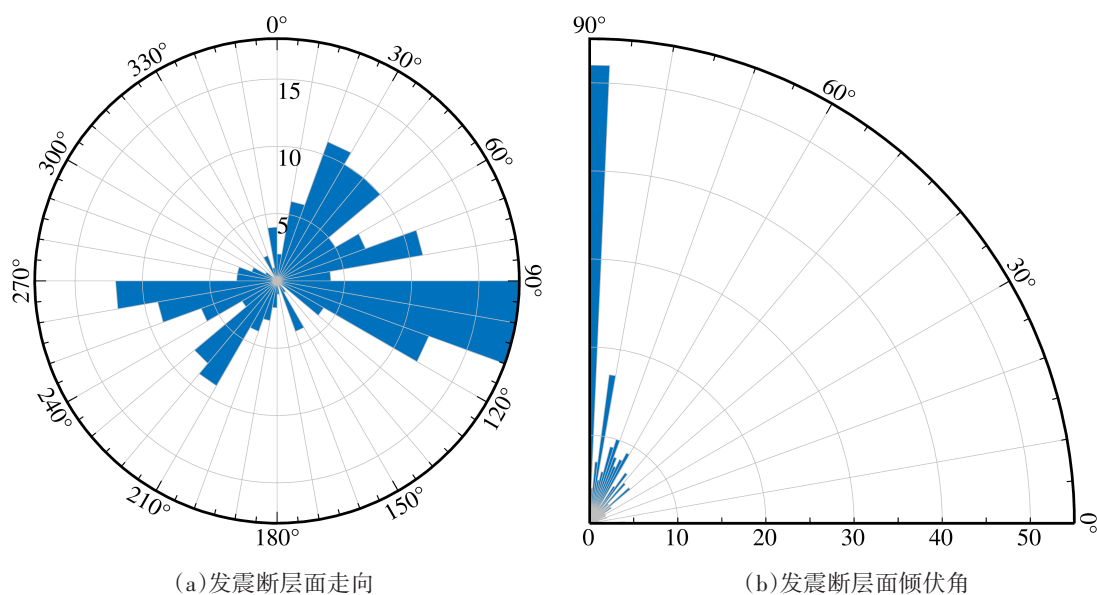


图6 发震断层走向和倾伏角统计图

Fig.6 Statistics of orientation and dip angle of seismogenic fault plane

2.2 结果分析

1975年2月4日海城 $M_s 7.3$ 地震的发震断层识别结果为NWW向,即震源机制解的节面Ⅱ,与震中附近的海城河断裂较为吻合(图5)。邓起东等^[27]根据宏观调查、地质考察、深部结构探测及模拟实验等资料研究认为,海城7.3级地震的发震构造是一条左旋错动的NWW向构造;林邦慧^[28]研究发现海城7.3级主震的发震构造是NWW向断层;郑确^[29]的双差层析成像表明海城7.3级地震在构造上发生在海城河一大洋河与金州断裂的交汇;本文结果与之一致。

1999年11月29日岫岩 $M_s 5.4$ 地震发震断层识别为NWW向(图5)。高常波^[30]通过分析本次地震的区域地质构造背景,认为该地震是1975年海城7.3级地震的NW向发震构造再次活动引起的;李宇彤^[31]利用数值模拟的方法,研究海城7.3级地震和岫岩5.4级地震的共性和个性,认为二者处于同一发震构造的不同部位;郑确^[29]发现岫岩5.4级地震发生在海城河一大洋河断裂与康家岭断裂交汇处;这些说明本文的识别结果是合理的。

在2013年1月23日灯塔 $M_s 5.1$ 地震25 km震中距范围内,有震源机制解数据7个,识别到的发震断层是NWW向(图5)。有学者推断,该孤立型地震的发震构造是NE向的营口—佟二堡断裂^[32];也有学者经过地震重定位研究发现,深部存在NW向的隐伏断裂^[33];戴盈磊等^[14]的研究表明灯塔5.1级

地震震源机制2个节面都处于剪应力加载状态;本文结果与之基本相符。

2008年11月14日海城 $M_L 4.6$ 地震、2015年11月23日大石桥 $M_L 4.5$ 地震和2017年12月19日岫岩 $M_L 4.8$ 地震的发震断层识别结果分别为NNE向、NNW向和NWW向(图5)。杨士超等^[34]对2008年10月至2020年12月海城 $M_s 7.3$ 地震老震区 $M_L \geq 2.0$ 地震进行的重新定位结果显示,老震区地震分为3个区段,即营口、海城,岫岩。海城区与岫岩区地震有明显空段。大石桥与岫岩区地震沿NW向分布,而海城震区除具有NW向展布的海城河断裂外,还存在沿海城—盖州NE向展布的隐伏断裂。以上3次地震正分别位于这3个地震区段内,且本文给出的发震断层与各自区段内的地震分布特征相吻合。

2012年2月2日盖州 $M_L 4.7$ 地震和2015年8月4日盖州 $M_L 4.8$ 地震属于盖州青石岭地震序列,发震断层识别结果同为NWW向(图5)。与张博等^[19]通过地震重定位并结合区域地震地质资料分析该震群发震构造为NW向铲式正断层的结果一致。

将震中距设置为100 km后,共搜索到10个震源机制解,识别2016年5月22日朝阳 $M_L 4.8$ 地震发震断层为NE向,符合辽西地区的地质构造格局(图5)。张帆等^[35]根据震源机制、震源深度、小震分布,区域构造特征等资料推断该地震发震构造为NEE向,也佐证了本文结果的可信度。

统计发现,根据震源区构造应力场识别的196个震源机制解发震断层走向以NWW为主,NE-

NNE向次之，且绝大多数的发震断层倾伏角较为陡立(如图6)。特别是在小震和震群活动较为频繁的海城、盖州等地区，识别的发震断层呈现共轭破裂，这与辽宁地区的主要发震、控震构造特征^[36]一致。同时，揭示出在整体NE走向的金州断裂分段处存在着NW向隐伏构造带，体现了辽宁地区中强地震的发生主要受到NE-NNE向断裂的控制，但发震构造基本上都是NW向断裂^[37]，NW向断裂与NE-NNE向断裂构成共轭格局^[38]。图5中，抚顺西北部的2次地震发震断层也与其附近的依兰-伊通断裂展布特征接近。

3 结论与讨论

本文根据震源区构造应力场特征对辽宁地区的地震震源机制解进行了发震断层面识别，详细分析了识别结果，得到以下主要结论。

(1)根据水平应变花面应变对震源机制解进行分类，发现辽宁地区的已有地震多为走滑型和正断型。

(2)计算得到196个地震震源区构造应力场结果。其中，最大主应力以NEE向为主，最小主应力以NNW向为主。前者倾伏角在近水平和近直立2个区间集中分布，后者倾伏角总体上较小。中间主应力方位分散，倾伏角多数较陡。应力形因子显示整个辽宁地区呈张应力占主导的走滑应力体系。

(3)9次4.5级以上典型地震的发震断层面识别结果与震源位置附近的地质构造相对应，和已有学者根据传统途径的研究成果较为一致。这在很大程度上体现本文结果是科学可靠的。

(4)基于辽宁地区走滑构造应力体系(图4)识别的196个地震发震断层面优势方位为NW向和NE-NNE向，大多为高倾角(图6)。说明该地区在现今构造应力作用下，几乎所有地震都以走滑型断层作为发震构造^[36]。安德森断层形成力学理论认为，区域中间主应力近于直立时，最大主应力与发震断层走向之间的夹角为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ^[39]。本文求解的构造应力场和据此识别的发震断层节面符合这一理论。

与中强地震相比，小震的发生更具随机性。而针对辽宁地区单个小震发震构造的研究稀少，本文未对 $M_L 4.5$ 以下地震发震断层识别结果逐一验证。如辽东半岛地区，小震活动频繁，且构造应力场条件复杂^[40]。张正帅等^[41]研究发现这一区域隐

伏的NW向断裂为渤海海水侵入创造了条件，造成多条活动断裂周边破碎介质含水率升高，孔隙压力增加，摩擦系数减小，从而导致大量中小地震发生在比天然构造地震更低的构造应力地区。本文表3中第9列摩擦系数较低的1号地震，3号地震和9号地震正位于该区域。此外，图5中不稳定系数介于0.4~0.6之间的发震断层，也基本分布在上述区域。断层不稳定系数较低意味着在背景构造应力场作用较弱的情况下，介质尚未达到或接近最不稳定状态而发生的破裂。综上，本文对辽宁地区中小地震发震断层的识别也具备较高的可靠性。从图3可知，辽宁西部和北部的地震活动性较弱，可供该方法使用的震源机制不够充足，有待随着震例数据的不断积累，后续开展更加深入的研究。

综上所述，本文将基于构造应力场信息识别震源机制解发震断层节面的方法应用于辽宁地区，识别结果可靠性明显，与传统途径相比该识别方法更加快速、便捷。可以在未来的孕震环境和发震构造研究、震后趋势研判，地震应急等实际工作中发挥作用。

致谢：审稿专家对本文的修改提出了宝贵建议，文中图件使用GMT软件绘制，辽宁省地震台为本文提供了观测数据，在此一并表示衷心感谢！

参考文献

- [1] 郑思源. 中国地震震源机制解数据库建设[D]. 武汉: 中国地震局地震研究所, 2019.
- [2] 许英才. 2023年沙雅 $M_s 6.1$ 地震和2012年洛浦 $M_s 6.0$ 地震矩张量反演及震源断层确定[J]. 地震学报, 2023, 45(05): 763-780.
- [3] 王润妍, 万永革, 宋泽尧, 等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制及其对周围区域的应力影响[J]. 地震, 2024, 44(01): 1-10.
- [4] 徐志双, 任静, 谭专条, 等. 利用震源机制解走向判定地震影响场长轴方向[J]. 地震研究, 2022, 45(01): 88-99.
- [5] 盛书中, 万永革, 蒋长胜, 等. 2015年尼泊尔 $M_s 8.1$ 强震对中国大陆静态应力触发影响的初探[J]. 地球物理学报, 2015, 58(05): 1834-1842.
- [6] 何晓慧, 倪四道, 刘杰. 2014年8月3日云南鲁甸 $M 6.5$ 地震破裂方向性研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(03): 253-263.
- [7] Vavryčuk V, Bouchaala F, Fischer T. High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic[J]. Tectonophysics, 2013(590): 189-195.

- [8] Vavryčuk V. Iterative joint inversion for stress and fault orientations from focal mechanisms[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 199(1): 69–77.
- [9] 盛书中, 陈桂华, 徐锡伟, 等. 基于构造应力场识别震源机制解节面中发震断层——以盈江地区为例[J]. *地球物理学报*, 2022, 65(11): 4273–4283.
- [10] 王亮, 焦明若, 钱蕊, 等. 利用双差地震成像方法反演辽南地区地壳速度结构[J]. *地震地质*, 2022, 44(02): 378–394.
- [11] 曹凤娟, 孙素梅, 杨牧苒, 等. 辽宁地区5级地震震源学指标体系研究[J]. *地震工程学报*, 2016, 38(03): 398–406.
- [12] 顾浩鼎, 陈运泰, 高祥林, 等. 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*, 1976(04): 270–285.
- [13] 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(02): 76–82.
- [14] 戴盈磊, 万永革, 孔祥雪, 等. 2013年辽宁灯塔 $M_5.1$ 地震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析[J]. *地震研究*, 2022, 45(04): 570–580.
- [15] 环文林, 张晓东, 宋昭仪. 中国大陆内部走滑型发震构造粘滑运动的结构特征[J]. *地震学报*, 1997, 19(03): 225–234.
- [16] 陈运泰, 刘瑞丰. 用P波初动资料确定地震震源机制教程(四)[J]. *地震地磁观测与研究*, 2021, 42(06): 1–12.
- [17] 王岩, 张博, 曹凤娟, 等. 辽宁地区2008年以来 $M_L \geq 3.0$ 地震震源机制解分析[J]. *防灾减灾学报*, 2016, 32(03): 1–6.
- [18] 林向东, 袁怀玉, 徐平, 等. 华北地区地震震源机制分区特征[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4589–4622.
- [19] 张博, 钱蕊, 夏彩韵. 盖州青石岭地震序列发震构造初探[J]. *地震学报*, 2017, 39(06): 848–859.
- [20] 苏培臻, 安祥宇, 李恩来, 等. 辽宁地区近期中小地震震源机制研究[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(11): 4023–4036.
- [21] 戴盈磊, 刘晓丹, 张文静, 等. 辽宁地区最小一维速度模型研究[J]. *华南地震*, 2023, 43(2): 35–45.
- [22] 万永革, 吴逸民, 盛书中, 等. P波极性数据所揭示的台湾地区三维应力结构的初步结果[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(11): 2809–2818.
- [23] 万永革. 震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法及序列震源机制总体特征分析[J]. *地球科学*, 2024, 49(07): 2675–2684.
- [24] 戴盈磊, 万永革, 梁永朵, 等. 基于震源机制解资料的辽宁地区现今构造应力场[J]. *地震*, 2020, 40(03): 112–130.
- [25] 戴盈磊, 万永革, 梁永朵, 等. 应用综合震源机制解法对辽宁及邻区现今构造应力场的初步分析[J]. *地震工程学报*, 2021, 43(03): 523–533+558.
- [26] 戴盈磊, 张文静, 王承伟, 等. 基于MSATSI的辽宁地区构造应力场特征[J]. *防灾减灾学报*, 2021, 37(03): 1–8.
- [27] 邓起东, 王挺梅, 李建国, 等. 关于海城地震震源模式的讨论[J]. *地质科学*, 1976(03): 195–204.
- [28] 林邦慧, 胡小幸. 1975年2月4日海城地震的破裂过程与海城地震序列空间分布的图象[J]. *中国地震*, 1988(02): 49–58.
- [29] 郑确. 辽宁地区地壳三维体波速度结构与典型区域地震危险性评估[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [30] 高常波, 钟以章. 1999年辽宁海城—岫岩5.6级地震的地质构造背景和发震构造[J]. *地震地质*, 2000(04): 405–412.
- [31] 李宇彤, 焦明若, 李芳. 岫岩 $MS 5.4$ 与海城 $MS 7.3$ 地震的共性和个性研究[J]. *地震研究*, 2005(03): 231–235.
- [32] 李彤霞, 陈楠, 吴建霆, 等. 2013年1月23日辽宁灯塔5.1级地震浅析[J]. *防灾减灾学报*, 2014, 30(2): 27–30.
- [33] 孙素梅, 马莉, 许振峰, 等. 辽宁灯塔 $M 5.1$ 地震序列重新定位研究[J]. *防灾减灾学报*, 2018, 34(3): 42–48.
- [34] 杨士超, 张博, 钱蕊, 等. 营口—海城地区地震序列谱振幅相关系数变化特征[J]. *地震地磁观测与研究*, 2021, 42(S1): 64–66.
- [35] 张帆, 韩晓明, 郝美仙, 等. 2016年5月22日辽宁朝阳4.6级地震震源机制和震源深度研究[J]. *中国地震*, 2017, 33(01): 141–153.
- [36] 雷清清, 廖旭, 董晓燕. 辽宁省地震构造研究[J]. *东北地震研究*, 2008, 24(04): 1–10.
- [37] 万波, 贾丽华, 戴盈磊, 等. 辽东半岛中强地震活动及其与构造相关性[J]. *地震地质*, 2013, 35(02): 300–314.
- [38] 万波, 靳超宇, 索锐. 辽宁省及邻近地区主要地震构造及其危险性判定[J]. *防灾减灾学报*, 2017, 33(1): 1–11.
- [39] Marshak S, Mitra G. Basic methods of structural geology[M]. Englewood Cliffs, New Jersey, USA: Prentice Hall, 1988: 163–164.
- [40] 段梦乔, 赵翠萍. 海城、盖州地区地震震源机制及一致性参数特征研究[J]. *地震*, 2019, 39(04): 39–53.
- [41] 张正帅, 夏彩韵, 郑建常, 等. 利用SH波对盖州震群震源谱参数的稳健反演研究[J]. *地球物理学进展*, 2020, 35(06): 2143–2152.