

戴盈磊,万永革,孔祥雪,等. 2022. 2013年辽宁灯塔  $M5.1$  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, 45(4):570–580, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0057.

Dai Y L, Wan Y G, Kong X X, et al. 2022. Central focal mechanism of the Dengta, Liaoning  $M5.1$  earthquake in 2013 and the analysis of its surrounding tectonic stress field[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(4):570–580, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0057.

## 2013年辽宁灯塔 $M5.1$ 地震震源机制中心解及震源区构造应力场特征分析\*

戴盈磊<sup>1</sup>, 万永革<sup>2,3\*</sup>, 孔祥雪<sup>1</sup>, 王承伟<sup>1</sup>, 索锐<sup>1</sup>

(1. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201;  
3. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:** 采用 HASH 方法计算得到辽宁灯塔  $M5.1$  地震震源机制解: 节面 I 走向为  $12.85^\circ$ , 倾角为  $89.42^\circ$ , 滑动角为  $175.83^\circ$ 。结合不同震源机制结果确定了本次地震震源机制中心解: 节面 I 走向为  $13.16^\circ$ , 倾角为  $88.64^\circ$ , 滑动角为  $171.01^\circ$ ; 节面 II 走向为  $103.38^\circ$ , 倾角为  $81.01^\circ$ , 滑动角为  $1.37^\circ$ 。为进一步研究本次地震的孕育背景和发生条件, 收集 2001—2013 年辽宁地区 128 个  $M_L 2.5 \sim 4.8$  地震的震源机制解资料, 反演该地区构造应力场, 模拟在其作用下产生的各种震源机制及相对剪应力和相对正应力的分布情况。结果表明: 辽宁地区在主压应力轴为 NEE 向, 主张应力轴为 NNW 向的走滑构造应力体系作用下, 经过一段时间的应力积累, 在剪应力最大区域、沿应力场最优节面发生破裂, 从而发生灯塔  $M5.1$  地震。

**关键词:** 灯塔  $M5.1$  地震; 震源机制中心解; 构造应力场; 剪应力; 辽宁地区

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0570-11  
doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0057

## 0 引言

2013年1月23日12时18分, 辽宁省辽阳市灯塔市与沈阳市苏家屯区交界处 ( $41.48^\circ\text{N}$ ,  $123.20^\circ\text{E}$ ) 发生  $M5.1$  地震, 震源深度 7 km。该地震位于郯庐断裂带北延段走向 NE 的营口—佟二堡断裂东北端附近, 属于孤立型地震事件。该地震是自 1999 年岫岩 5.4 级地震后, 辽宁地区发生的最大地震, 打破了辽宁内陆地区 5 级地震长达 13 a 的平静格局 (焦明若等, 2014), 且震中位置

处在地震活动性较低的辽宁中北部地区, 具有一定的指示意义。地震发生后, 不同机构和学者基于不同方法和数据相继给出了该地震的震源机制解, 如中国地震局地震预测研究所 (2013) 第一时间使用了 CAP 方法计算了灯塔  $M5.1$  地震的震源机制解; 李彤霞等 (2014)、王岩等 (2016) 使用了 P 波初动方法; 林向东等 (2017) 在研究华北地区震源机制分区特征时, 使用 FOCMEC 方法求解了该地震的震源机制解; 苏培臻等 (2020) 对辽宁地区中小地震震源机制进行研究时, 同样使用 CAP 方法得到了灯塔地震的震源机制解。但这

\* 收稿日期: 2022-02-26.

基金项目: 沈抚新区浑河断裂带活断层探测与地震危险性评价项目 (LNZC2018-0173) 资助.

第一作者简介: 戴盈磊 (1983-), 工程师, 主要从事大地构造与地球动力学方面的研究.

E-mail: handsomedyl@163.com.

♣ 通讯作者简介: 万永革 (1967-), 研究员, 主要从事构造应力场、地震应力触发等方面的研究.

E-mail: wanyg217217@vip.sina.com.cn.

些结果存在明显的差异性和离散度, 究竟选择哪一个作为后续相关研究的依据, 值得探讨。谢弘臻和王九洋 (2018) 根据 sPL - Pg 等震相数据使用入射角法和单纯形法重新测定了灯塔地震震源深度为 14 km; 孙素梅等 (2018) 对灯塔地震序列进行了重新定位。但以上研究并未对该地震发生的动力学背景进行深入分析。

本文使用基于 P 波初动极性和 S/P 振幅比的 HASH 方法 (Hardebeck, Shearer, 2002, 2003) 求取 2013 年灯塔 M5.1 地震的震源机制解, 将已有结果的差别进行量化, 给出灯塔 M5.1 地震的震源机制中心解。为了进一步研究本次地震孕育和发生的动力学过程, 收集 2001—2013 年辽宁地区 128 次  $M_L 2.5 \sim 4.8$  地震的震源机制解, 反演该地区的构造应力场。进而模拟在其作用下, 可能出现的各种震源机制类型, 为深入研究灯塔 M5.1 地震的发震条件和辽宁中北部孕震机理提供数据和参考。

## 1 HASH 方法计算灯塔 M5.1 地震震源机制解

为了保证较高的台站分布率, 本文从震中距小于 200 km 的 32 个台站提取 P 波初动和 S/P 振幅比数据, 其具体分布如图 1 所示。其中, P 波初动极性符号直接从辽宁地震台正式观测报告读取。在 SAC 软件环境下, 将所选台站的观测波形旋转至 R、T、Z 方向, 去仪器响应, 卷积到位移记录, 进行 1~15 Hz 的带通滤波, 剔除信噪比小于 3 的波形。标注 P 波和 S 波到时, 为了保证精准度, 人工量取径向分量 R 和垂直分量 Z 的直达 P 波峰值, 矢量求和后, 作为 P 波振幅; 由于转换波可能在直达 S 波前到达, 取 S 波到时的前后 1 s 内, 3 个分量上的最大振幅作为 S 波振幅。由图 1 可知, 计算输入了 23 个 P 波初动极性数据, 不包含 emergent 极性符号; 22 个 S/P 振幅比数据, 而可使用的有效振幅比数量是 16 个, 因为解算时 S/P 振幅比的最小阈值设置为大于 2.5, 有 6 个台站的数据不满足该条件被舍弃。

HASH 方法通过使用不同梯度的速度模型进行射线追踪得到可靠的离源角 (Hardebeck, Shearer, 2002), 计算过程中, 本文使用卢造勋等 (2002)、

赵宏阳和陈晓非 (2017), 郑确 (2018) 提出的速度模型 (图 2)。灯塔 M5.1 地震震源机制解计算

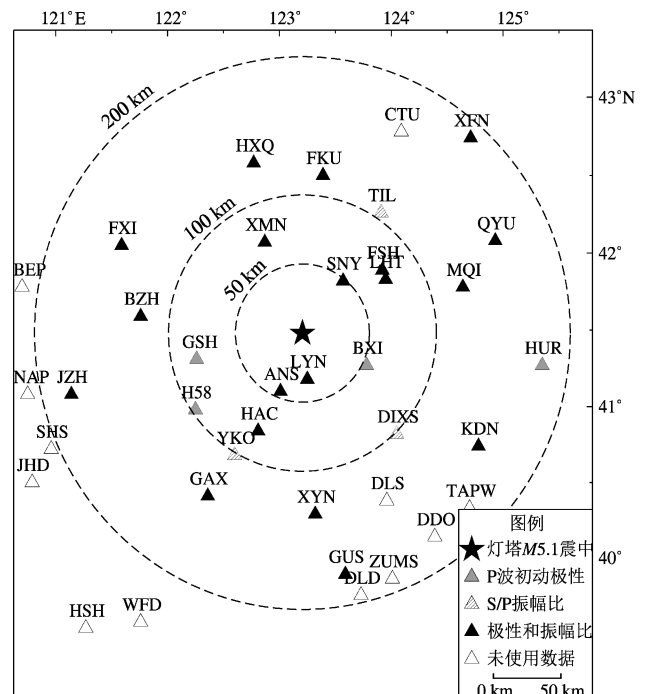


图 1 本文研究所选台站的分布

Fig. 1 The distribution of seismic stations used in this study

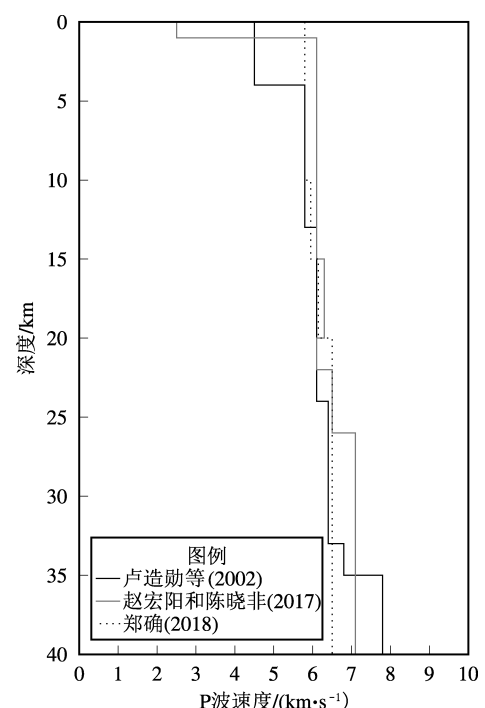


图 2 本文计算使用的速度模型

Fig. 2 Velocity model used for calculation in this paper

结果见表 1, 节面 I 走向为  $12.85^\circ$ , 倾角为  $89.42^\circ$ , 滑动角为  $175.83^\circ$ 。断层面不确定度  $24^\circ$ , 辅助断层面不确定度  $29^\circ$ ; P 波极性数量 23, 初动矛盾比 0.00; 逼近最优解概率 67%, 台站分布率 76%; S/P 振幅比数量 16, 平均  $\lg(S/P)$  矛盾比 0.49。本次地震强度中等, 震中位于辽宁中北部, 台站分布均匀, 用于计算的数据较为充足且可靠。在 P 波初动极性数据和 S/P 振幅比数据的共同约束下, 最终结果的质量分级为“B”, 在通常可接受的 A、B、C、D 等 4 个质量等级中 (许英才等, 2021) 处于中上, 比较理想。

表 1 不同来源的灯塔 M5.1 地震震源机制解及本文得到的震源机制中心解和标准差

Tab. 1 Focal mechanism solutions of the Dengta M5.1 earthquake and the standard deviation of the central focal mechanism from different sources

序号	震源机制 (初始解) <sup>①</sup>			作者/机构, 方法	震源机制中心解 <sup>②</sup>			标准差 S/(°)	最小空间旋转 角/(°) <sup>③</sup>
	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)		走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)		
1	11	84	177	李彤霞等 (2014), P 波初动法	103.32	81.01	1.32	10.928 950	7.77
2	16	86	161	中国地震局地震预测研究所, CAP 法	103.38	81.01	1.37	10.928 730	10.75
3	15	90	180	王岩等 (2016), P 波初动法	103.32	81.01	1.32	10.928 950	9.25
4	100.07	88.29	4.70	林向东等 (2017), FOCMEC 法	103.37	81.01	1.36	10.928 739	8.77
5	195	84	154	苏培臻等 (2020), CAP 法	103.38	81.02	1.37	10.928 731	18.81
6	12.85	89.42	175.83	本文, HASH 法	103.36	81.02	1.39	10.928 749	4.90

注: ①为输入的震源机制解; ②为不同初始解得到的震源机制中心解; ③为以中国地震局地震预测研究所结果作为初始解的震源机制中心解与其它震源机制的最小空间旋转角。

由表 1 可知, 以不同来源震源机制作为初始解得到的中心解都差别甚微, 标准差大体一致且精确到小数点后第 4 位, 体现出中心解计算方法的稳定性。其中以中国地震局地震预测研究所给出的震源机制作为初始解得到的中心解标准差是最小的。本文以此结果 (节面 I 走向  $13.16^\circ$ , 倾角  $88.64^\circ$ , 滑动角  $171.01^\circ$ ; 节面 II 走向  $103.38^\circ$ , 倾角  $81.01^\circ$ , 滑动角  $1.37^\circ$ ) 作为灯塔 M5.1 地震的震源机制中心解。P 轴走向  $58.61^\circ$ , 倾角  $5.38^\circ$ , 不确定范围分别是  $47.76^\circ \sim 68.76^\circ$  和  $-2.28^\circ \sim 12.54^\circ$ ; B 轴走向  $184.64^\circ$ , 倾角  $80.91^\circ$ , 不确定范围分别是  $63.32^\circ \sim 240.30^\circ$  和  $73.20^\circ \sim 91.71^\circ$ ; T 轴走向  $327.92^\circ$ , 倾角  $7.31^\circ$ , 不确定范围分别是  $317.06^\circ \sim 338.06^\circ$  和  $-0.22^\circ \sim 14.88^\circ$ , 震源机制中心解的标准差为  $10.928 7^\circ$ 。

需要指出的是, 以中国地震局地震预测研究所测定的结果为初始解得到的中心解的标准差最小, 但这并不表明该机构给出的结果离最终选定

## 2 震源机制中心解的确定

收集不同来源的灯塔 M5.1 地震震源机制解, 与本文结果一并列于表 1。采用万永革 (2019) 提出的确定同一地震多个震源机制中心解的方法, 求解得到与这些震源机制最小空间旋转角的平方和最小的震源机制中心解, 将中心解与各震源机制最小空间旋转角的标准差作为误差范围, 选择标准差最小的结果, 给出最终解与各输入震源机制的最小空间旋转角 (表 1)。

的中心解最近。这 6 个初始解中, 本文使用 HASH 方法求解的震源机制与最终选定的中心解距离是最近的, 为  $4.90^\circ$ 。这是因为震源机制中心解的求解是一个非线性的问题, 采用雅可比矩阵求解各参数的偏量可能有略微超出或未达到最优解, 但离最优解应很近 (万永革, 2019), 这就是选择标准差最小的解作为最优解的缘故, 也说明本文采用 HASH 方法计算灯塔 M5.1 震源机制解是合理的。计算时输入的各震源机制和本文计算所得的震源机制中心解及其不确定范围利用万永革 (2015) 的应力场表述方式, 如图 3 所示。图 3a 中黑色弧线表示中心震源机制解的 2 个节面, 绿色弧线为其不确定范围, 紫色弧线表示计算时输入的各震源机制节面, 红色、蓝色和黄色圆点表示中心解的 P 轴、T 轴和 B 轴, 其不确定范围用对应颜色的封闭曲线表示; 图 3b 中压缩和膨胀区域分别用蓝色和红色表示。从图 3 可知, 震源机制中心解的 B 轴不确定范围相对大一些, 但整体上参数较为集中。

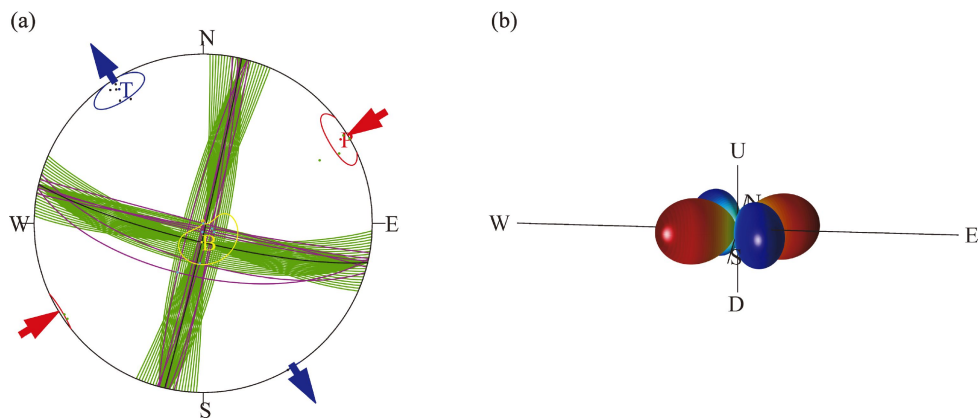


图 3 2013 年灯塔 M5.1 地震震源机制中心解 (a) 及空间三维辐射花样 (b)

Fig. 3 Central focal mechanism solution of the Dengta M5.1 earthquake in 2013 (a) and its 3D pattern (b)

3 应力场反演

本文收集灯塔 M5.1 地震发生前 2001—2013 年辽宁地区  $M_L2.5 \sim 4.8$  地震的震源机制解资料，共计 128 个（表 2）。其中，2001—2007 年的  $M_L3.5 \sim 4.1$  地震的震源机制解从国家地震科学数据共享中心<sup>①</sup>获取，震源机制解多采用 P 波初动法求解；2008—2012 年  $M_L \geq 3.0$  地震的震源机制资

料是王岩等（2016）使用 P 波初动法给出的结果；2010—2013 年  $M_L2.5 \sim M_L3.0$  的震源机制解来自林向东等（2017）利用 FOCMEC 方法计算所得结果；这些震源机制中，采用 P 波初动法求解的矛盾比不超过 0.36。根据世界应力图（Zoback，1992）的方案对以上震源机制解进行分类，其中，正断型 33 个、正走滑型 10 个、走滑型 46 个、逆走滑型 7 个、逆断型 17 个，不确定型 15 个，正断型和走滑型占 70%，如图 4 所示。

表 2 2001—2013 年辽宁地区  $M_L2.5 \sim 4.8$  地震震源机制解

Tab. 2 Focal mechanism solutions of  $M_L2.5 \sim 4.8$  earthquakes in Liaoning area from 2001 to 2013

序号	发震日期	震中位置		$M_L$	震源机制解			资料来源
		$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		走向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	滑动角/ $(^\circ)$	
1	2001-01-01	122.43	40.82	3.6	11	53	133	国家地震科学数据共享中心
2	2001-02-15	123.17	40.93	3.6	225	57	-153	国家地震科学数据共享中心
3	2001-09-20	123.00	40.53	3.8	20	78	-10	国家地震科学数据共享中心
4	2002-04-30	122.82	40.67	3.9	10	86	2	国家地震科学数据共享中心
5	2002-04-30	122.82	40.63	3.5	7	50	165	国家地震科学数据共享中心
6	2002-04-30	122.87	40.68	3.8	18	90	172	国家地震科学数据共享中心
7	2002-04-30	122.78	40.68	3.5	14	72	162	国家地震科学数据共享中心
8	2002-06-17	122.95	40.67	3.9	220	34	-123	国家地震科学数据共享中心
9	2002-10-25	122.87	40.60	3.6	221	72	-116	国家地震科学数据共享中心
10	2003-02-21	122.28	40.02	3.7	32	62	-6	国家地震科学数据共享中心
11	2003-03-30	123.55	41.85	4.1	52	83	-11	国家地震科学数据共享中心
12	2003-06-16	123.03	40.55	3.8	91	85	150	国家地震科学数据共享中心
13	2004-01-06	125.02	38.83	3.5	43	89	128	国家地震科学数据共享中心
14	2004-03-07	122.65	40.65	3.6	193	76	34	国家地震科学数据共享中心
15	2004-09-27	123.02	40.52	3.5	48	90	160	国家地震科学数据共享中心
16	2004-10-05	122.68	40.65	3.6	193	73	-126	国家地震科学数据共享中心

① <http://data.earthquake.cn/>.

续表 2

序号	发震日期	震中位置		$M_L$	震源机制解			资料来源
		$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		走向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	滑动角/ $(^\circ)$	
17	2006-02-27	123.05	40.10	3.7	21	73	134	国家地震科学数据共享中心
18	2006-05-06	122.85	40.67	3.6	295	69	-52	国家地震科学数据共享中心
19	2006-06-18	122.83	40.67	3.7	344	20	136	国家地震科学数据共享中心
20	2007-03-11	120.02	38.92	3.8	71	81	-40	国家地震科学数据共享中心
21	2007-06-06	120.67	41.62	3.5	287	28	-95	国家地震科学数据共享中心
22	2007-08-24	123.03	40.55	3.7	222	53	-101	国家地震科学数据共享中心
23	2007-09-25	123.62	42.45	3.5	347	50	150	国家地震科学数据共享中心
24	2008-01-14	123.03	40.53	3.2	207	61	3	王岩等, 2016
25	2008-01-15	122.85	40.65	3.9	65	90	180	王岩等, 2016
26	2008-04-28	123.60	41.88	3.0	70	90	180	王岩等, 2016
27	2008-05-13	121.98	40.15	3.8	195	82	-174	王岩等, 2016
28	2008-05-30	123.37	41.10	3.4	75	90	180	王岩等, 2016
29	2008-11-03	122.88	40.63	4.1	179	60	27	王岩等, 2016
30	2008-11-09	122.93	40.63	4.0	229	25	-137	王岩等, 2016
31	2008-11-11	122.78	40.67	3.5	242	49	-99	王岩等, 2016
32	2008-11-11	122.80	40.67	3.0	258	42	-101	王岩等, 2016
33	2008-11-11	122.77	40.68	3.4	238	51	-76	王岩等, 2016
34	2008-11-14	122.90	40.65	4.8	33	48	-75	王岩等, 2016
35	2008-12-09	123.17	40.97	3.5	210	77	-161	王岩等, 2016
36	2008-12-11	122.93	42.10	4.1	196	63	-161	王岩等, 2016
37	2009-01-13	122.93	40.62	3.1	284	28	-45	王岩等, 2016
38	2009-01-14	123.06	40.47	3.9	36	68	0	王岩等, 2016
39	2009-02-02	122.84	40.66	3.4	197	81	-131	王岩等, 2016
40	2009-03-01	122.50	40.75	3.1	35	84	174	王岩等, 2016
41	2009-04-02	122.25	39.33	3.4	193	55	25	王岩等, 2016
42	2009-05-11	122.90	40.65	3.0	264	87	21	王岩等, 2016
43	2009-05-17	122.83	40.66	3.1	204	81	44	王岩等, 2016
44	2009-05-19	122.38	40.98	3.0	23	51	165	王岩等, 2016
45	2009-07-19	122.67	40.69	4.3	211	67	1	王岩等, 2016
46	2009-08-04	121.66	41.93	3.0	303	32	97	王岩等, 2016
47	2009-08-26	123.17	40.98	3.1	214	64	18	王岩等, 2016
48	2009-10-07	122.64	40.70	3.0	214	66	-171	王岩等, 2016
49	2009-11-08	121.65	40.96	4.1	212	76	-172	王岩等, 2016
50	2010-01-11	122.83	40.66	3.5	11	55	153	王岩等, 2016
51	2010-01-15	120.37	41.67	2.9	310.99	74.81	-48.24	林向东等, 2017
52	2010-01-22	123.03	40.53	2.9	275.08	76.43	-64.23	林向东等, 2017
53	2010-01-23	123.04	40.53	3.2	34	69	-94	王岩等, 2016
54	2010-01-26	122.92	40.65	2.6	87.45	36.22	-72.91	林向东等, 2017
55	2010-01-28	118.88	39.97	2.7	214.56	85.02	84.98	林向东等, 2017
56	2010-02-05	122.75	40.67	2.8	24.88	17.96	-32.95	林向东等, 2017
57	2010-02-06	122.82	40.67	2.5	179.08	46.92	-69.25	林向东等, 2017
58	2010-02-09	122.89	40.66	3.0	30	50	-269	王岩等, 2016
59	2010-03-22	122.24	39.33	3.0	28	87	88	王岩等, 2016
60	2010-03-23	122.23	39.33	2.5	121.47	56.17	-53	林向东等, 2017
61	2010-03-27	123.21	41.48	3.0	255	71	-73	王岩等, 2016

续表 2

序号	发震日期	震中位置		$M_L$	震源机制解			资料来源
		$\lambda_E/(^\circ)$	$\varphi_N/(^\circ)$		走向/ $(^\circ)$	倾角/ $(^\circ)$	滑动角/ $(^\circ)$	
62	2010-03-27	122.22	39.33	2.8	117.89	48.44	-48.07	林向东等, 2017
63	2010-04-10	121.37	39.60	2.7	149.35	22.27	62.73	林向东等, 2017
64	2010-04-14	120.87	39.27	2.8	291.23	75.92	69.35	林向东等, 2017
65	2010-04-15	123.53	40.03	2.5	293.73	24.81	51.92	林向东等, 2017
66	2010-05-19	122.82	40.67	2.5	229.64	61.12	-72.81	林向东等, 2017
67	2010-06-02	122.95	40.63	3.1	181	50	-170	王岩等, 2016
68	2010-06-04	122.94	40.63	3.2	287	38	-90	王岩等, 2016
69	2010-06-09	122.74	40.70	3.0	320	49	38	王岩等, 2016
70	2010-06-26	122.68	40.70	2.8	296.18	65.41	-78.99	林向东等, 2017
71	2010-07-09	122.22	39.32	2.7	143.29	60.22	54.82	林向东等, 2017
72	2010-07-21	123.06	40.52	3.8	184	83	-162	王岩等, 2016
73	2010-07-23	123.05	40.52	2.7	105.05	71.11	-47.21	林向东等, 2017
74	2010-08-12	122.62	40.72	2.8	291.69	76.43	-64.23	林向东等, 2017
75	2010-08-14	122.80	40.67	2.5	132.72	79.2	28.16	林向东等, 2017
76	2010-08-16	122.71	40.68	3.0	215	64	-138	王岩等, 2016
77	2010-08-17	122.47	40.82	2.7	182.09	76.43	6.46	林向东等, 2017
78	2010-09-11	118.83	39.87	2.7	126.58	50.73	-77.04	林向东等, 2017
79	2010-09-22	123.05	40.53	3.6	24	68	-24	王岩等, 2016
80	2010-09-25	122.90	40.63	2.6	23.82	31.47	70.57	林向东等, 2017
81	2011-02-24	122.70	40.68	2.7	106.34	54.23	-82.6	林向东等, 2017
82	2011-03-16	122.70	40.68	2.6	276.23	63.94	-44.31	林向东等, 2017
83	2011-04-03	122.65	40.70	2.6	241.82	70.08	-84.68	林向东等, 2017
84	2011-04-04	122.73	40.72	2.5	15.6	77.05	59.13	林向东等, 2017
85	2011-05-24	121.55	40.92	2.6	250.93	40.26	-82.25	林向东等, 2017
86	2011-06-22	122.87	40.65	2.8	251.99	56.36	-71.89	林向东等, 2017
87	2011-06-27	123.80	41.88	3.2	27	83	-30	王岩等, 2016
88	2011-08-07	123.63	40.23	2.5	94.17	35.53	-53.95	林向东等, 2017
89	2011-08-19	118.88	39.98	2.5	120.93	40.26	-82.25	林向东等, 2017
90	2011-10-03	123.23	41.50	2.9	290.19	39.67	26.03	林向东等, 2017
91	2011-10-21	122.87	40.65	2.5	333.5	68.53	-13.12	林向东等, 2017
92	2011-11-23	118.87	39.98	2.6	296.41	75.92	-69.35	林向东等, 2017
93	2011-12-24	122.47	39.97	2.9	121.57	11.17	-26.3	林向东等, 2017
94	2012-02-02	122.40	40.50	4.2	219	20	83	王岩等, 2016
95	2012-02-02	122.42	40.48	4.8	45	89	-18	王岩等, 2016
96	2012-02-02	122.41	40.49	3.5	351	18	92	王岩等, 2016
97	2012-02-02	122.41	40.49	3.0	220	70	0	王岩等, 2016
98	2012-02-06	122.42	40.48	2.9	94.59	35.53	-30.64	林向东等, 2017
99	2012-03-08	122.72	40.68	2.9	269.51	26.81	-20.42	林向东等, 2017
100	2012-04-04	123.21	41.49	4.1	15	90	180	王岩等, 2016
101	2012-04-16	122.75	40.71	3.3	338	16	95	王岩等, 2016
102	2012-04-18	123.56	41.19	3.6	35	90	180	王岩等, 2016
103	2012-05-14	123.55	41.20	2.5	116.44	60	-35.26	林向东等, 2017
104	2012-05-18	122.70	40.68	2.8	273.84	77.3	-38.26	林向东等, 2017
105	2012-05-22	122.61	40.71	3.2	60	70	0	王岩等, 2016
106	2012-06-14	122.65	40.72	2.7	317.67	65.1	84.49	林向东等, 2017

续表 2

序号	发震日期	震中位置		$M_L$	震源机制解			资料来源
		$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$		走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$	
107	2012-07-07	122.88	40.65	2.7	131.32	70.08	1.82	林向东等, 2017
108	2012-07-12	122.40	40.49	4.2	30	72	160	王岩等, 2016
109	2012-07-12	122.41	40.49	3.6	219	81	2	王岩等, 2016
110	2012-07-15	122.39	40.49	3.7	265	80	2	王岩等, 2016
111	2012-07-22	122.61	40.72	3.0	80	63	0	王岩等, 2016
112	2012-07-25	122.62	40.72	2.6	292.99	82.95	-44.56	林向东等, 2017
113	2012-08-25	123.22	41.51	3.0	252	48	-145	王岩等, 2016
114	2012-08-30	122.78	40.72	2.7	305.27	42.06	-50.89	林向东等, 2017
115	2012-09-07	122.73	40.68	2.6	104.98	56.17	53	林向东等, 2017
116	2012-09-09	122.72	40.70	2.7	287.99	57.2	40.12	林向东等, 2017
117	2012-09-15	122.42	40.50	3.2	189	1	36	王岩等, 2016
118	2012-09-15	122.71	40.69	3.4	46	65	137	王岩等, 2016
119	2012-10-07	119.69	41.02	3.0	20	90	180	王岩等, 2016
120	2012-10-17	122.82	40.67	2.5	179.41	25.46	78.3	林向东等, 2017
121	2012-10-17	122.92	40.63	2.5	261.4	42.06	-31.11	林向东等, 2017
122	2012-11-01	122.39	40.49	4.0	46	65	137	王岩等, 2016
123	2012-11-05	123.53	41.18	2.7	301.72	58.68	-60.35	林向东等, 2017
124	2012-11-23	121.01	41.62	3.1	283	31	41	王岩等, 2016
125	2012-11-28	122.38	40.48	2.8	100.58	21.09	-44.01	林向东等, 2017
126	2012-12-09	118.85	39.88	2.8	335.23	71.25	-7.1	林向东等, 2017
127	2012-12-17	122.69	40.68	3.2	358	60	270	王岩等, 2016
128	2013-01-16	122.68	40.68	2.9	295	25	-90	林向东等, 2017

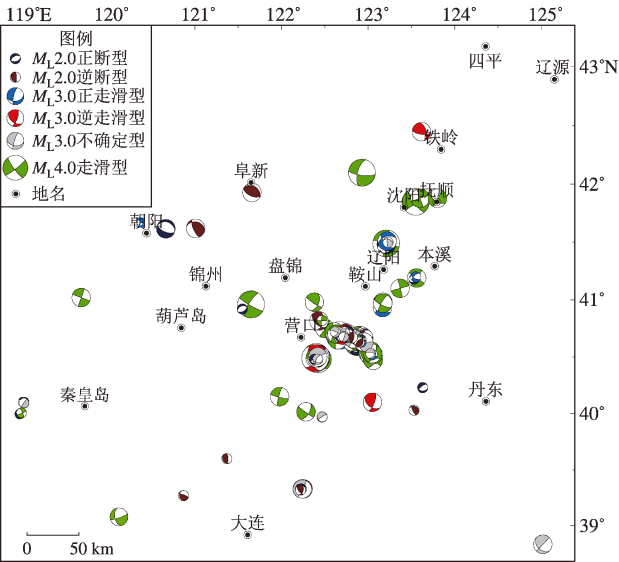


图 4 2001—2003 年辽宁地区  $M_L2.5 \sim 4.8$  地震震源机制分布

Fig. 4 The distribution of focal mechanisms of  $M_L2.5 \sim 4.8$  earthquakes in Liaoning from 2001 to 2013

本文采用全局网格搜索算法 (Wan *et al*, 2016) 进行计算, 该方法以断层滑动方向与剪应力方向一致为原则, 可考虑震级的不同对输入震源机制分配相应权重, 从而得到精确的反演结果。结合应力形因子 (Gephart, Forsyth, 1984)  $R = (S_2 - S_1) / (S_3 - S_1)$  ( $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ , 分别代表主压应力、中间应力和主张应力的大小) 对 3 个主应力的相对大小进行判断。设置 3 个主应力轴的搜索步长为  $1^{\circ}$ , 应力形因子  $R$  的搜索步长为 0.05, 置信度水平为 90%, 进行构造应力场反演, 所得结果及其不确定范围见表 3 和图 5。图 5a 为反演结果的等面积投影, 图中 90% 置信度水平下最大剪应力所在截面用绿色弧线表示, 剪应力方向用黄色小箭头表示, 3 个主应力轴的 90% 置信区间用  $S_1$ ,  $S_2$  和  $S_3$  周围的封闭曲线表示, 输入的震源机制节面用黑色弧线表示, 主压应力轴的最优方位用红色大箭头表示, “可能断层” 的理论滑动方向用红色小箭头表示, 主张

应力轴的最优方位用蓝色大箭头表示,“可能断层面”的观测滑动方向用蓝色小箭头表示。图 5b 是所得应力状态的三维表示。其中,主压应力的相对大小和方向用红色填充,主张应力的相对大小和方向用蓝色填充。

反演得到辽宁地区构造应力场主压应力轴为 NEE 向,主张应力轴为 NNW 向,中间应力轴倾角

较陡; $R = 0.45$ , 3 个主应力轴基本呈等差排列(万永革等, 2011), 属走滑类型。本文反演结果与已有研究结果(张萍, 蒋秀琴, 2000; 葛荣峰等, 2009; Wan, 2010) 比较一致, 体现出辽宁地区 NE—NNE 向断层为右旋走滑, NW 向断层为左旋走滑, 几乎所有地震都以走滑断层作为发震构造的背景特征(万波等, 2017)。

表 3 应力场反演结果  
Tab. 3 Result of stress field inversion

参数类型	主压应力轴		中间应力轴		主张应力轴		应力形因子 <i>R</i>
	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	方位/(°)	倾角/(°)	
最优解	252.06	20.00	71.00	70.00	161.94	0.34	0.45
不确定范围	252.02 ~ 256.06	12.00 ~ 24.00	70.50 ~ 75.00	66.00 ~ 78.00	161.44 ~ 165.94	-3.66 ~ 8.34	0.40 ~ 0.45

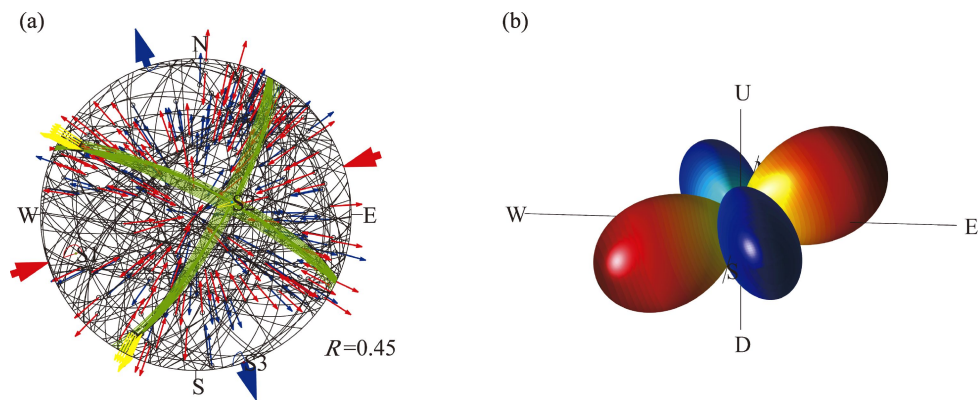


图 5 应力场反演结果 (a) 及其三维示意 (b)

Fig. 5 Result of stress field inversion (a) and its 3D diagram (b)

4 震源机制与应力场关系

万永革 (2020) 提出了模拟不同应力体系下, 可产生的震源机制类型及节面上剪应力和正应力表现的方法。本文基于该方法, 得到在辽宁地区构造应力场的约束下产生的各种震源机制类型, 及其作用在灯塔 M5.1 地震震源机制中心解 2 个节面上产生的剪应力和正应力, 并用最大剪应力作归一化, 得到相对剪应力和相对正应力, 如图 6 所示。

灯塔 M5.1 地震震源机制中心解节面 I 走向 13.16°, 倾角 88.64°, 滑动角 171.01°, 相对剪应力和相对正应力分别为 0.878 (最大为 1) 和 -0.366 (拉张为正), 剪应力滑动角 -163.7°,

与观测滑动角相差 25.29°; 节面 II 走向 103.38°, 倾角 81.01°, 滑动角 1.37°, 相对剪应力和相对正应力分别为 0.793 和 0.547, 剪应力滑动角 2.2°, 与观测滑动角相差 0.83°。很明显, 2 个节面基本上都处于剪应力最大区域, 且剪应力滑动角与对应节面的观测滑动角比较接近。李彤霞等 (2014) 推断本次地震的发震构造为营口—佟二堡断裂带, 对应本次地震震源机制中心解节面 I, 而该断裂是在右行剪应力作用下, 使早期断裂再活动形成新的断裂(单家增等, 2004); 孙素梅等 (2018) 对灯塔 M5.1 地震序列进行重定位研究, 认为 NS、NE 向地震剖面为发震控制断裂, 对应中心解节面 I, 推测 NNW 向地震剖面是一条隐伏断裂, 对应中心解节面 II。本文模拟在辽宁地区构造应力条件下,



2 个节面震前都基本处于最大剪应力加载状态, 而剪应力导致的破裂形式与作为发震构造的营口—佟二堡断裂的活动形式一致。

综合来看, 本次地震是在辽宁地区整体走滑型构造应力场作用下, 经过一定时间的应力积累, 沿应力场最优节面的能量释放。

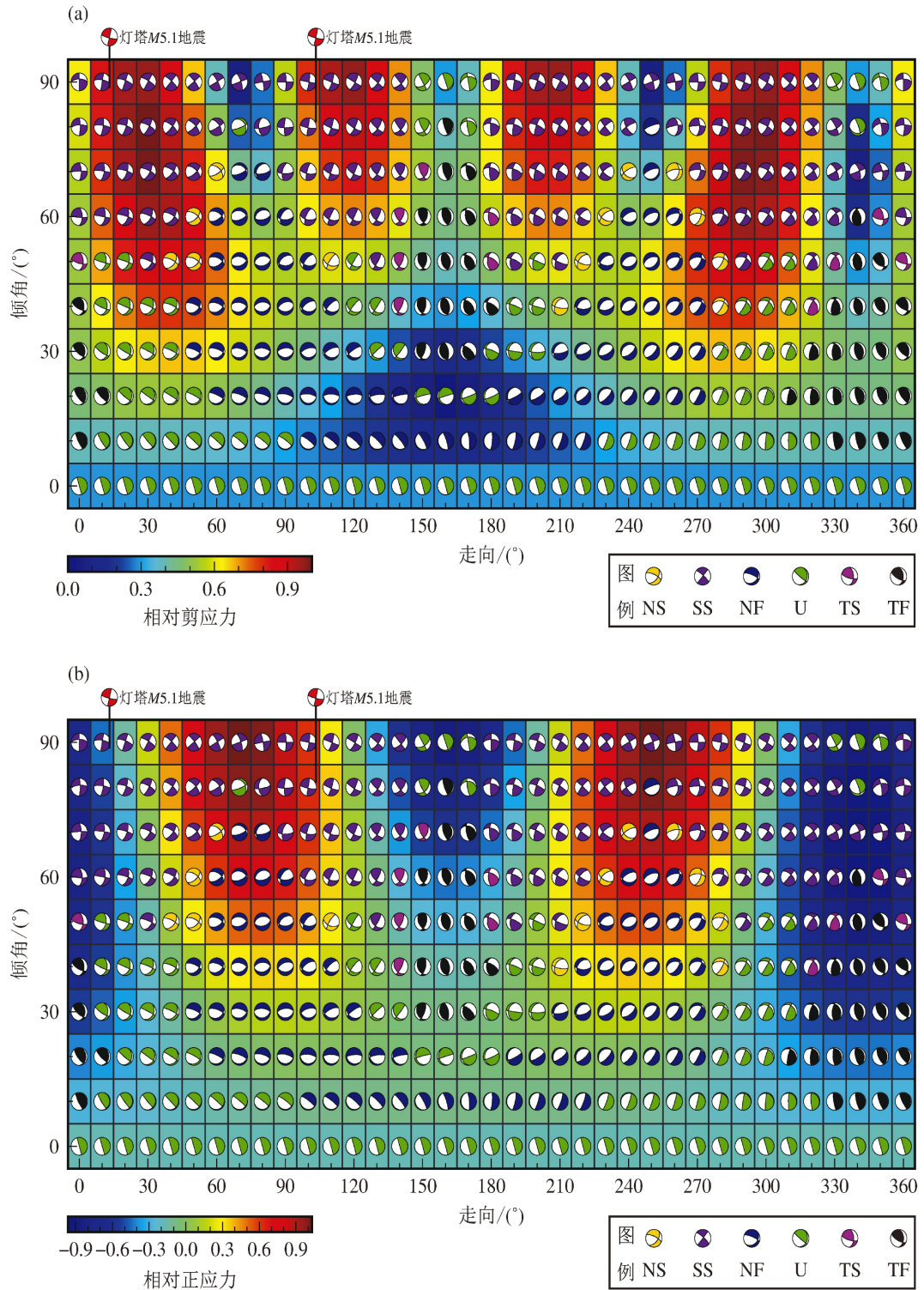


图6 辽宁地区构造应力场作用下的震源机制解及相对剪应力 (a) 和相对正应力 (b) 分布

Fig. 6 Focal mechanism solutions and distribution of relative shear stress (a) and relative normal stress (b) by the action of the tectonic stress field in Liaoning

## 5 结论

本文使用 HASH 方法计算 2013 年辽宁灯塔 M5.1 地震震源机制中心解, 结合有关学者和机构给出的结果得到本次地震的震源机制中心解, 反演辽宁地区的构造应力场并研究本次地震发生的动力学背景, 主要得出以下结论:

(1) 通过 HASH 方法, 利用 P 波初动极性和 S/P 振幅比数据计算得到灯塔 M5.1 地震震源机制解走向  $12.85^\circ$ , 倾角  $89.42^\circ$ , 滑动角  $175.83^\circ$ 。

(2) 灯塔 M5.1 地震震源机制中心解节面 I 走向  $13.16^\circ$ , 倾角  $88.64^\circ$ , 滑动角  $171.01^\circ$ ; 节面 II 走向  $103.38^\circ$ , 倾角  $81.01^\circ$ , 滑动角  $1.37^\circ$ , 为走滑型地震。

(3) 灯塔 M5.1 地震前, 辽宁地区构造应力场的主压应力轴为 NEE 向, 主张应力轴为 NNW 向, 它们的倾角均较小, 3 个主应力轴基本呈等差排列, 形成了走滑应力体系。

(4) 在辽宁地区构造应力场作用下, 右行剪切应力经过积累, 达到一定程度而发生灯塔 M5.1 走滑地震。

本文使用 HASH 方法进行求取, 是为了与之前的成果形成对比, 为计算该地震震源机制中心解提供一个补充。在反演辽宁地区构造应力场时, 本文并没有参照戴盈磊等 (2020) 对输入的震源机制数据根据震级不同进行加权的处理方式, 因为输入数据中, 最小震级是  $M_L 2.5$ , 最大震级是  $M_L 4.8$ , 震级跨度并不大, 且这里侧重的是所谓“5 级地震平静期”辽宁地区的整体应力状态。已有研究表明, 华北地震区 5 级以上地震一般具有较明确的构造背景 (环文林等, 1997)。本文通过对辽宁地区震源机制解与构造应力场关系研究, 体现了在同一应力体系下该地区可产生震源机制的多样性, 同时发现灯塔 M5.1 地震是典型的在背景构造应力场作用下发生的破裂, 验证了之前学者的推断, 并进一步揭示了辽宁中北部地区的地震发生条件和活动特点。

辽宁地震台提供了本文研究数据, 审稿专家提出了宝贵修改意见, 在此一并表示感谢。

## 参考文献:

- 戴盈磊, 万永革, 梁永朵, 等. 2020. 基于震源机制解资料的地区现今构造应力场[J]. 地震, 40(3): 112–130.
- 葛荣峰, 张庆龙, 解国爱, 等. 2009. 郯庐断裂带北段及邻区现代地震活动性与应力状态[J]. 地震地质, 31(1): 141–154.
- 环文林, 张晓东, 宋昭仪. 1997. 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, 19(3): 225–234.
- 焦明若, 王海燕, 曹凤娟, 等. 2014. 2013 年 1 月 23 日辽阳灯塔 5.1 级地震异常分析[J]. 防灾减灾学报, 30(1): 1–6.
- 李彤霞, 陈楠, 吴建霆, 等. 2014. 2013 年 1 月 23 日辽宁灯塔 5.1 级地震浅析[J]. 防灾减灾学报, 30(2): 27–30.
- 林向东, 袁怀玉, 徐平, 等. 2017. 华北地区地震震源机制分区特征[J]. 地球物理学报, 60(12): 4589–4622.
- 卢造勋, 蒋秀琴, 潘科, 等. 2002. 中朝地台北缘地区的地震层析成像[J]. 地球物理学报, 45(3): 338–351.
- 苏培臻, 安祥宇, 李恩来, 等. 2020. 辽宁地区近期中小地震震源机制研究[J]. 地球物理学报, 63(11): 4023–4036.
- 孙素梅, 马莉, 许振峰, 等. 2018. 辽宁灯塔 M5.1 地震序列重新定位研究[J]. 防灾减灾学报, 34(3): 42–48.
- 单家增, 张占文, 孙红军, 等. 2004. 营口—佟二堡断裂带成因机制的构造物理模拟实验研究[J]. 石油勘探与开发, (1): 15–17.
- 万波, 靳超宇, 索锐. 2017. 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, 33(1): 1–11.
- 万永革, 盛书中, 许雅儒, 等. 2011. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究[J]. 地球物理学报, 54(4): 994–1001.
- 万永革. 2015. 联合采用定性和定量断层资料的应力张量反演方法及在乌鲁木齐地区的应用[J]. 地球物理学报, 58(9): 3144–3156.
- 万永革. 2019. 同一地震多个震源机制中心解的确定[J]. 地球物理学报, 62(12): 4718–4728.
- 万永革. 2020. 震源机制与应力体系关系模拟研究[J]. 地球物理学报, 63(6): 2281–2296.
- 王岩, 张博, 曹凤娟, 等. 2016. 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, 32(3): 1–6.
- 谢弘臻, 王九洋. 2018. 辽阳灯塔  $M_S 5.1$  地震震源深度分析[J]. 中国地震, 34(4): 704–712.
- 许英才, 曾宪伟, 王银, 等. 2021. 2020 年 6 月 9 日中卫  $M_L 3.4$  地震的震源机制及其中心解的测定[J]. 地震科学进展, 51(6): 258–265.
- 张萍, 蒋秀琴. 2000. 辽宁地区震源机制解及应力场特征的研究[J]. 东北地震研究, 16(1): 1–7.
- 赵宏阳, 陈晓非. 2017. 1975 年海城  $M_S 7.3$  地震强地面运动模拟[J]. 地球物理学报, 60(7): 2707–2715.
- 郑确. 2018. 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, 47–49.
- 中国地震局地震预测研究所. 2013. 2013 年 1 月 23 日辽宁省灯塔市  $M_S 5.1$  地震的震源机制解[EB/OL]. (2013–01–25) [2022–

- 02–20]. <https://www.ief.ac.cn/kydts/info/2013/14144.html>.
- Gephart J W, Forsyth D W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data; application to the San Fernando Earthquake Sequence[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B11): 3905–3920.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2002. A new method for determining first – motion focal mechanisms[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(6): 2264–2276.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2003. Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6): 2434–2444.
- Wan Y G, Sheng S Z, Huang J C, *et al.* 2016. The grid search algorithm of tectonic stress tensor based on focal mechanism data and its application in the boundary zone of China, Vietnam and Laos[J]. *Journal of Earth Science*, 27(5): 777–785.
- Wan Y G. 2010. Contemporary tectonic stress field in China[J]. *Earthquake Science*, 23(4): 377–386.
- Zoback M L. 1992. First – and second – order patterns of stress in the lithosphere; the world stress map project[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 97(B8): 11703–11728.

## Central Focal Mechanism of the Dengta, Liaoning *M*5.1 Earthquake in 2013 and the Analysis of Its Surrounding Tectonic Stress Field

DAI Yinglei<sup>1</sup>, WAN Yongge<sup>2,3</sup>, KONG Xiangxue<sup>1</sup>, WANG Chengwei<sup>1</sup>, SUO Rui<sup>1</sup>

(1. *Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, Liaoning, China*)

(2. *Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China*)

(3. *Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China*)

### Abstract

In this paper, the focal mechanism solution of the Dengta, Liaoning *M*5.1 earthquake is calculated by the HASH method. The strike of one nodal plane is  $12.85^{\circ}$ , the dip angle is  $89.42^{\circ}$ , and the slip angle is  $175.83^{\circ}$ . Its central focal mechanism solution is determined in combination with other results. The strike of nodal plane I is  $13.16^{\circ}$ , the dip angle is  $88.64^{\circ}$ , and the slip angle is  $171.01^{\circ}$ ; the strike of nodal plane II is  $103.38^{\circ}$ , the dip angle is  $81.01^{\circ}$ , and the slip angle is  $1.37^{\circ}$ , which solve the problem of non – unique focal mechanism data selection for subsequent related studies. In order to further research the seismogenic background and occurrence conditions of this earthquake, 128 focal mechanism solutions in Liaoning region over the past 10 years are collected. The tectonic stress field is inverted to simulate the various focal mechanisms and the distribution of relative shear stress, relative normal stress generated under its action. The results show that the Dengta *M*5.1 earthquake is a result from strike – slip tectonic stress system with NEE principal compressive stress axis and NNW stress axis in Liaoning. After a period of stress accumulation, the fracture occurs along the optimal nodal plane of the stress field in the area of maximum shear stress.

**Keywords:** the Dengta *M*5.1 earthquake; central focal mechanism solution; tectonic stress field; shear stress; Liaoning region