

王莹,金昭娣,赵韬. 2024. 2022年四川马尔康6.0级震群序列震源机制特征分析[J]. 地震研究, 47(3): 379–390, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0035.

Wang Y, Jin Z D, Zhao T. 2024. The characteristics of the focal mechanisms of the Ma'erkang M_s 6.0 earthquake sequence in 2022[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(3): 379–390, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0035.

2022年四川马尔康6.0级震群序列震源机制特征分析*

王莹, 金昭娣, 赵韬*

(陕西省地震局, 陕西 西安 710068)

摘要: 采用近震全波形矩张量方法反演了2022年四川马尔康6.0级震群序列22次地震的震源机制解, 结果显示: 这22次地震全部为走滑型, 断层面走向呈NNW和NE两个优势方向, 断层面倾角近似直立, 滑动角分布在 0° 和 180° 附近, P 轴优势方位为NNW–SEE向, 倾伏角接近水平, 表明此次地震事件主要受区域NNW–SEE向水平挤压应力场控制。3次5级以上地震震源机制均与序列其他地震的总体震源机制差异较小, 说明序列震源机制较为一致。结合精定位结果综合分析认为: 马尔康震群属于多断层面触发性震群, 3次5级以上地震是不同断裂的破裂事件, 其中5.8级和6.0级地震发震断层面走向为NNW, 为左旋走滑破裂事件; 5.2级地震发震断层面走向为NE, 为右旋走滑破裂事件, 3个发震断层均以走滑错动为主, 断层面近似直立。

关键词: 马尔康6.0级震群; 震源机制解; 矩张量反演; 地震序列; 发震构造

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)03-0379-12

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0035

0 引言

巴颜喀拉块体是位于青藏地块中部的长条状活动块体, 是我国大陆强震的主体活动地区(邓起东等, 2010; 程佳等, 2011)。近年来, 随着巴颜喀拉块体边界断裂带发生一系列强震, 人们对其周缘主控边界断裂的研究程度也越来越高(闻学泽, 2011, 2018; 陈君贤等, 2021; 任俊杰等, 2017; 李平恩等, 2019; Jia *et al.*, 2021; 刘雷等, 2021)。2021年巴颜喀拉块体内部发生玛多7.4级地震, 2022年又发生马尔康6.0级震群, 巴颜喀拉地块内部活动断裂及其强震孕育能力再一次引起了地震学家的关注。

地震发生后, 快速准确地确定该地震的

发震断裂, 可以为地震灾害评估和震后快速救援提供有用的参考资料。地震的震源机制解可以直观地反映地震破裂的几何特征和运动学特征, 有助于了解震源区应力状态和发震构造, 而余震序列的震源机制则携带着应力在空间和时间上的变化信息(易桂喜等, 2019, 2020, 2021; 陈俊磊等, 2020; 王宇玺, 宫悦, 2021; 张建勇等, 2022)。本文采用近震全波形矩张量反演方法反演马尔康6.0级震群序列22次地震的震源机制解, 讨论分析此次序列的震源机制特征和震源区应力状态等, 并结合精定位和区域构造背景, 进一步探讨马尔康6.0级震群的发震构造, 为分析此次地震的孕震机理以及区域构造动力学环境提供参考。

* 收稿日期: 2023-03-21.

基金项目: 中国地震局地震预测开放基金(XH23079D); 中国地震局监测预报司震情跟踪定向工作任务(2024010116).

第一作者简介: 王莹(1987-), 高级工程师, 主要从事地震活动性和数字地震学研究. E-mail: wy200543@163.com.

通信作者简介: 赵韬(1989-), 高级工程师, 主要从事地震监测和震源机制研究. E-mail: zhaotaow@163.com.

1 方法与数据

本文使用中国地震台网中心提供的宽频带数字波形记录, 计算马尔康 6.0 级震群 3 级以上地震震源机制 (图 1)。对于 4 级以上地震, 挑选震中距 100 ~ 300 km 范围内质量良好、方位覆盖均匀的地震台站的波形资料, 4 级以下地震则挑选 50 ~ 150 km 范围内的台站记录, 最终选取 22 个地震事件。去除仪器响应后, 进行矩张量反演。其中, 3 次 5 级以上地震反演采用的滤波频段为 0.01 ~ 0.07 Hz, 4 级地震为 0.02 ~ 0.08 Hz, 3 级地震为 0.03 ~ 0.1 Hz。反演使用的速度模型为 Crust 2.0 模型。

地震震源机制解的计算采用近震全波形矩张量反演方法。在双力偶点源模型中, 矩张量反演方法可表示为 (Kawakatsu, 1998; Tajima *et al*, 2002):

$$\sum_i G_i^{sk}(t) m_i^s = d^k(t) \quad (1)$$

式中: $G_i^{sk}(t)$ 和 $d^k(t)$ 分别表示震源 s 至台站 k 的理论格林函数和台站 k 的实际观测记录; m_i^s 表示矩张量的第 i 个分量。当地壳速度模型确定时, 可通过 F - K 法 (频率波数法) (Wang, Herrmann, 1980) 计算得到格林函数。然后利用最小二乘法将观测波形与不同深度的格林函数进行拟合, 最后根据目标函数 VR 确定最佳解 (Dreger, Helmberger, 1993; Fukuyama *et al*, 1998), 计算如下:

$$VR = \left[1 - \sum_k \frac{\sqrt{\int (d^k(t) - o^k(t))^2 dt}}{\sqrt{\int d^k(t)^2 dt}} \right] \times 100\% \quad (2)$$

式中: $o^k(t)$ 表示理论波形记。VR 值越大, 表明理论波形与实际波形拟合程度越高, 结果越可靠。VR 值最大时对应的深度即为最佳深度。

本文计算的核心程序为 MTINV 程序。在台站方位角分布较为均匀的情况下, 此方法使用 3 个台站的记录就可以得到较好的矩张量解, 且 P 、 T 轴

方位的偏差可控制在 10° 以内 (Ichinose *et al*, 2003)。该方法也已成功应用于陕西及邻区中强地震的矩张量快速实时反演中, 并取得了较好的效果 (赵韬等, 2016)。

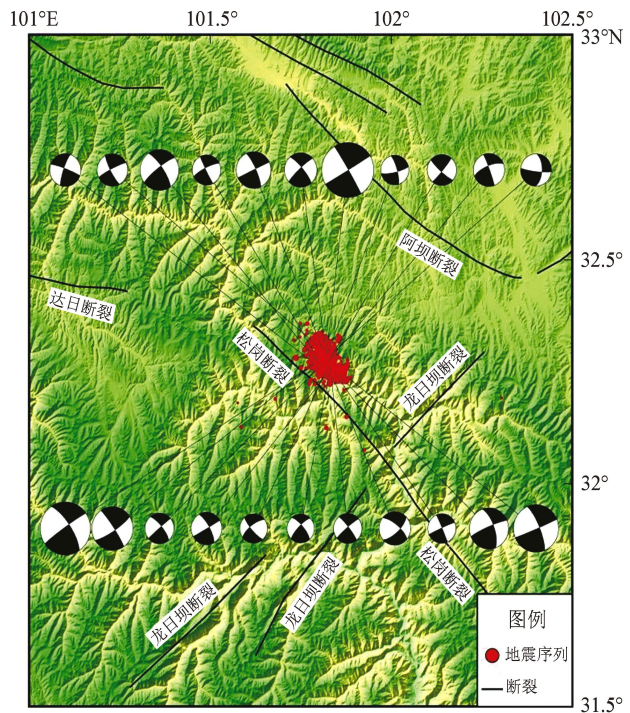


图 1 马尔康 6.0 级震群附近构造分布及 22 次震源机制结果

Fig. 1 Structures and 22 focal mechanisms in the vicinity of the Ma'erkang $M_{6.0}$ earthquake swarm

2 地震序列震源机制解结果

本文采用全波形矩张量反演方法最终反演得到马尔康 6.0 级震群序列 22 个中强地震的震源机制解 (表 1), 其中 $M_s \geq 5$ 地震 3 个, $4.0 \leq M_s < 5.0$ 地震 3 个, $3.0 \leq M_s < 4.0$ 地震 16 个。

2.1 3 次 5 级以上地震震源机制解

图 2 ~ 4 分别是反演的马尔康 6 月 10 日 0 时 3 分 5.8 级、1 时 28 分 6.0 级和 3 时 27 分 5.2 级地震震源机制解的结果, 每个结果包括各地震事件震源机制深度误差图、最佳深度处的波形拟合图和反演结果。

图 2 显示 6 月 10 日 0 时 3 分马尔康 5.8 级

地震，在深度约为7 km时，反演方差达到最小值。7 km深度对应的波形拟合图共使用了15个台站的波形记录，用于反演此地震事件的震源机制。可以看出，绝大多数分量的拟合度均大于90%，7 km深度的实际波形与理论波形拟合结果较好，反演结果可信。反演的震源机制为走滑性质，节面Ⅰ走向NNW，节面Ⅱ走向NE。

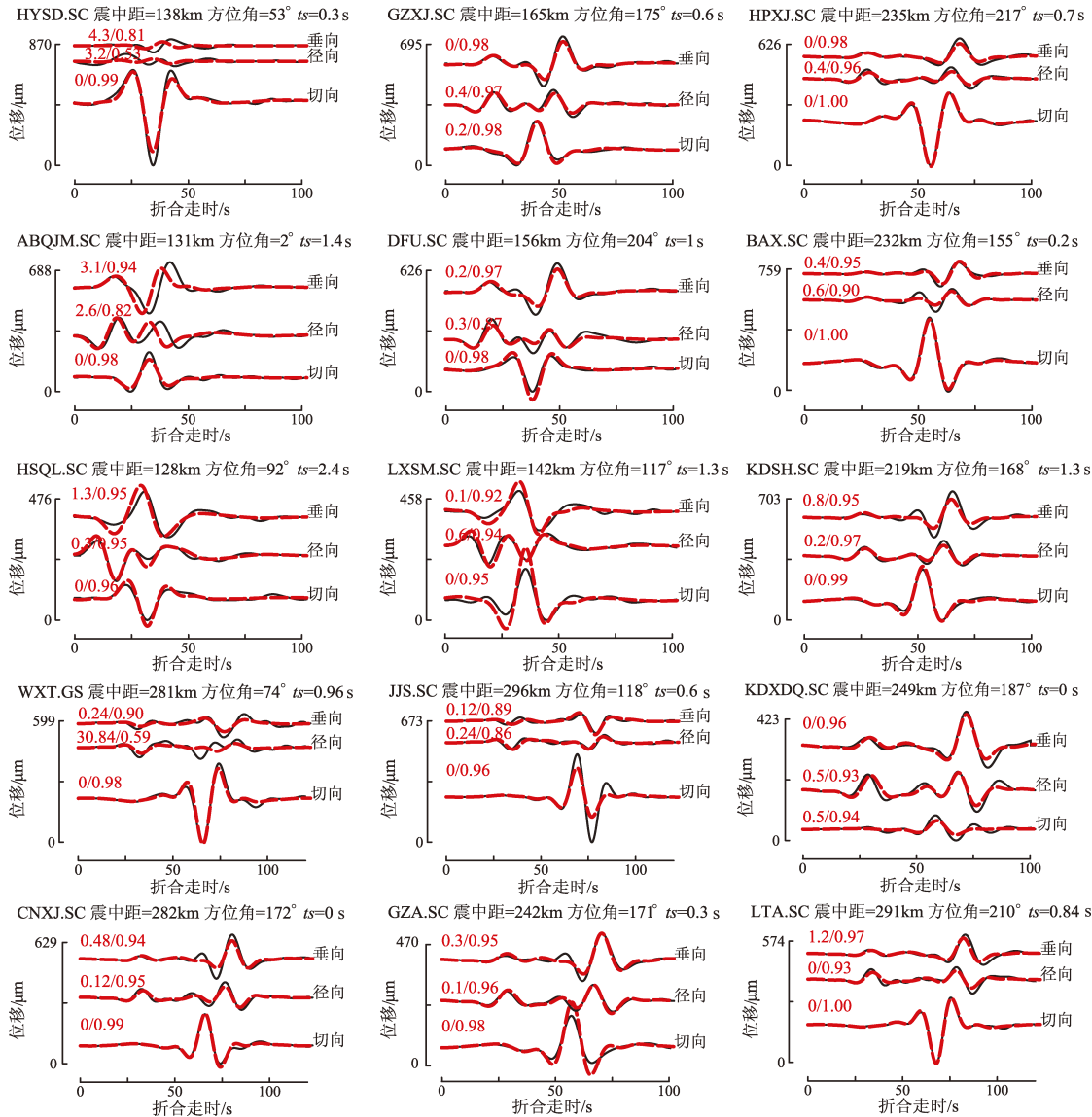
6月10日1时28分马尔康6.0级地震的反演方差和震源机制解随深度的变化结果显示(图3)，在深度约为7 km时，反演方差达到最

小值。7 km深度波形拟合时，共使用了16个台站的波形记录，实际波形与理论波形拟合结果较好，反演结果可信。反演的震源机制同为走滑性质，两个节面走向与5.8级地震类似。

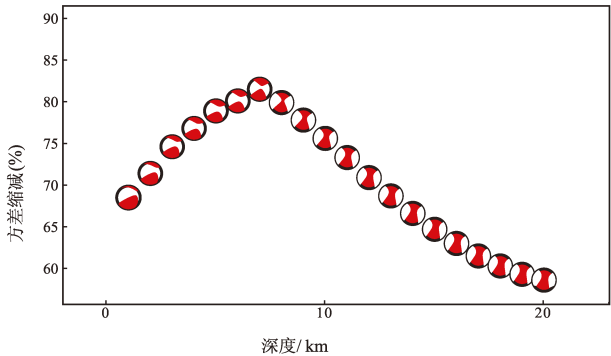
6月10日3时27分马尔康5.2级地震的反演结果显示(图4)，矩心深度约为7 km时，波形拟合结果较好。反演得到的矩震级为 M_w 5.18，最佳双力偶解的节面Ⅰ走向为NNW向，节面Ⅱ走向为NE向。震源机制性质同前两次地震一致，均为走滑型。

表1 本文计算的马尔康6.0级震群序列中22次地震事件的震源机制解
Tab. 1 The focal mechanism solutions of 22 earthquakes of the Ma'erkang M_s 6.0 earthquake swarm

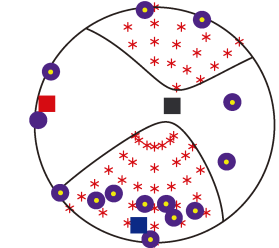
序号	地震事件	震级 (M_w)	矩心深度/ km	节面Ⅰ			节面Ⅱ			反演所用 台站数	VR值 (%)
				走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)		
1	20220610000326	5.58	7	326	73	4	234	86	163	15	81.5
2	20220610002119	4.74	5	57	79	-174	326	85	-11	16	68.7
3	20220610012836	5.89	7	329	88	-1	59	89	-178	16	69
4	20220610032702	5.18	7	337	77	-2	68	88	-167	15	74.1
5	20220610043541	3.55	5	2	58	-9	97	82	-148	7	70.7
6	20220610043728	4.50	5	340	68	8	247	83	158	22	56.9
7	20220610045434	3.99	7	335	79	1	244	89	169	9	41.3
8	20220610074922	3.53	9	152	80	-7	243	83	-170	6	83.2
9	20220610080948	3.35	7	320	74	2	229	88	164	7	60.2
10	20220610115224	3.22	8	246	87	178	336	88	3	6	47.3
11	20220610175101	3.26	7	344	77	-13	77	78	-167	4	68.2
12	20220611030619	3.37	9	131	81	5	40	85	171	4	75.8
13	20220611174837	3.54	7	199	80	173	290	83	10	6	62.4
14	20220612122512	3.28	13	321	82	6	231	84	172	5	77.6
15	20220613092900	3.64	8	47	69	-159	309	70	-23	5	76.1
16	20220614054824	3.29	9	244	77	-177	153	87	-13	4	72.9
17	20220614181110	4.46	8	325	75	10	232	80	164	16	67.6
18	20220614182047	3.19	8	233	70	-167	138	78	-21	4	57.4
19	20220616104647	3.60	4	248	69	176	339	87	21	12	65.1
20	20220618071814	3.55	8	330	74	-1	60	89	-164	13	53.2
21	20220618072651	3.15	5	319	73	15	225	76	163	6	67.6
22	20220622064407	3.74	5	319	78	8	228	82	168	6	58.1



(a) 波形拟合图



(b) 深度误差图



节面1: 走向=326° 倾角=73° 滑动角=4°
节面2: 走向=234° 倾角=86° 滑动角=163°
DC=91.9% CLVD=8.1% 拟合度=81.5%
矩震级=5.58 震源深度7.0km
(c) 反演结果

注: 黑色实线为观测波形, 红色实线为理论计算的波形。

图2 2022年6月10日00:03分马尔康5.8级地震最佳深度处波形拟合图(a)、震源机制深度误差图(b)和反演结果(c)

Fig. 2 Waveform fitting at the optimal depth (a), error of the focal mechanism depth (b), and the inverted focal mechanism (c) of the Ma'erkang M_s 5.8 earthquake at 00:03 on June 10, 2022

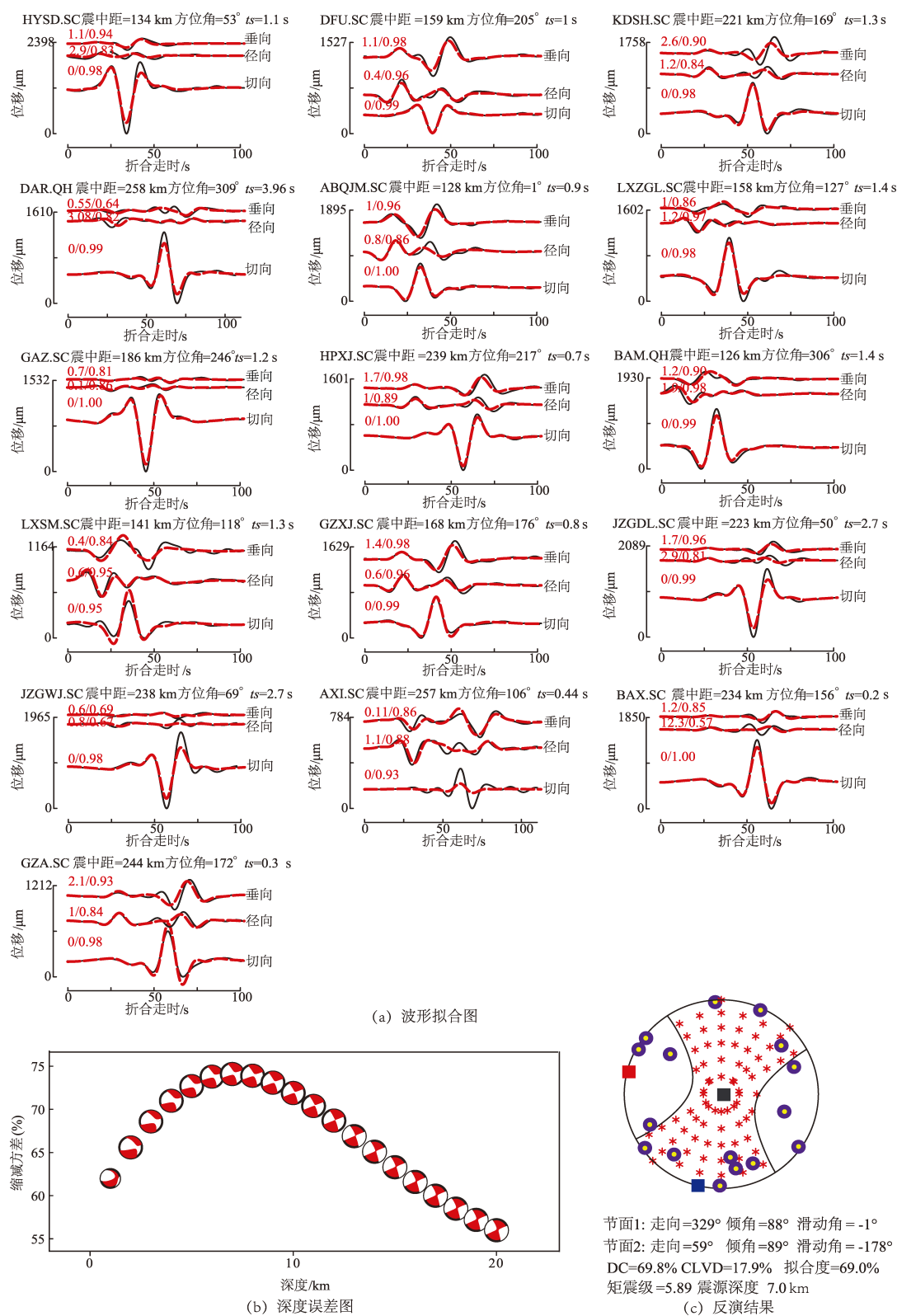
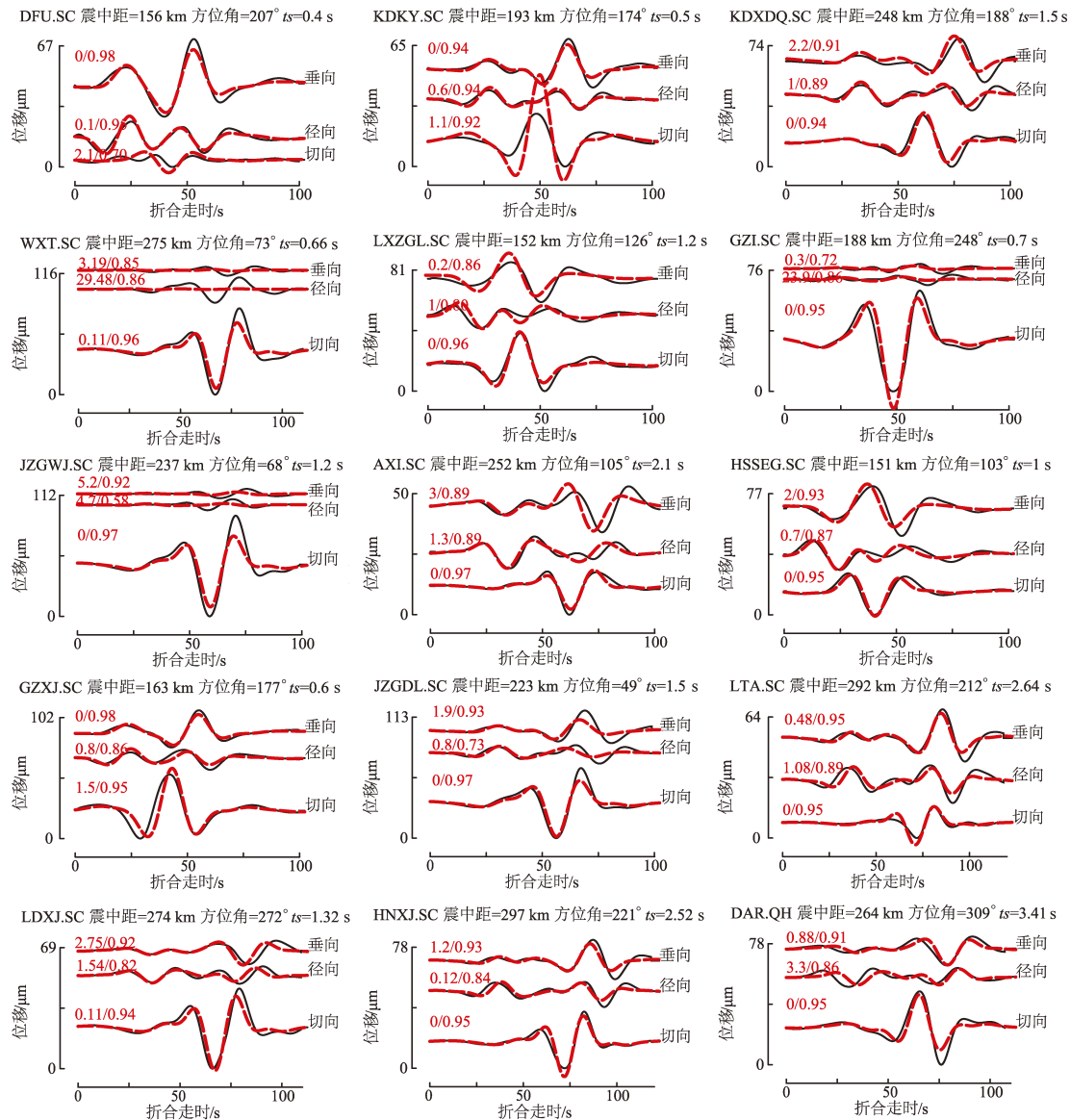
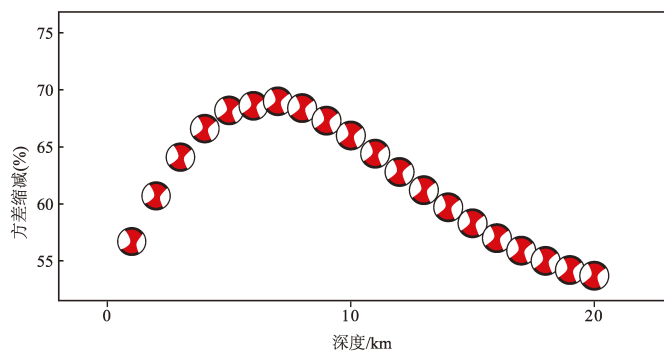


图3 2022 年 6 月 10 日 01:28 分马尔康 6.0 级地震最佳深度处波形拟合图 (a)、震源机制深度误差图 (b) 和反演结果 (c)

Fig. 3 Waveform fitting at the optimal depth (a), error of the focal mechanism depth (b), and the inverted focal mechanism (c) of the Ma'erkang M_s 6.0 earthquake at 01:28 on June 10, 2022

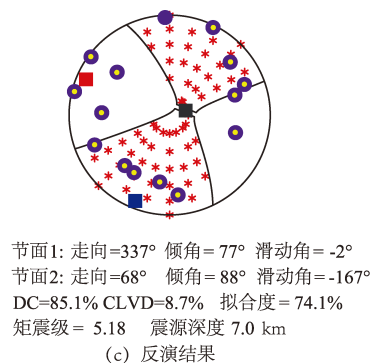


(a) 波形拟合图



(b) 深度误差图

注：黑色实线为观测波形，红色实线为理论计算的波形。



(c) 反演结果

图4 2022年6月10日03:27分马尔康5.2级地震最佳深度处波形拟合图(a)、震源机制深度误差图(b)和反演结果(c)

Fig. 4 Waveform fitting at the optimal depth (a), error of the focal mechanism depth (b), and the inverted focal mechanism (c) of the Ma'erkang M_s 5.2 earthquake at 03:27 on June 10, 2022

2.2 序列其他地震震源机制解

表 1 列出了本文计算得到的马尔康 6.0 级地震序列中 22 次地震事件的震源机制解结果，以及反演每个事件所使用的台站数目和反演拟合度 VR 值。序列其他地震事件反演过程与 3 次 5 级以上地震一致，每个地震事件的反演过程中至少有 4 个台站参与，台站对震中的包围较好，平均 VR 值为 64% 以上。除 2 次地震外，序列矩心深度主要集中在 (7 ± 2) km，与 3 次 5 级以上地震深度较为接近。

根据万永革（2022）提出的震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法，对本文计算所得的马尔康地震序列震源机制解进行分类，并将分类结果用球面三角形图的方式表示（图 5）。图中，三角形的三条边分别为震源机制 *P*、*T*、*B* 轴倾伏角的刻度，三角形中的白色线条为网格线，黑色虚线表示震源机制类型分类的界限，SS 表示走滑型，NS 表示正走滑型，N 表示正断型，RS 表示逆走滑型，R 表示逆断型。背景颜色表示相对面应变 AS 值的大小，序列震源机制在球面三角形分类中用沙滩球表示。如图 5 所示，马尔康 6.0 级震群序列的 22 个震源机制全部为走滑型。

3 地震序列震源机制解特征分析

为了进一步研究马尔康 6.0 级震群震源机制的总体特性，本文还分别对比分析了序列中 3 次 5 级以上地震震源机制和其他地震总体震源机制的特征（万永革，2019，2022）。序列其他地震的总体震源机制是指将所有地震所释放的标量地震矩进行累加，得到序列地震的总体矩张量，再将总体

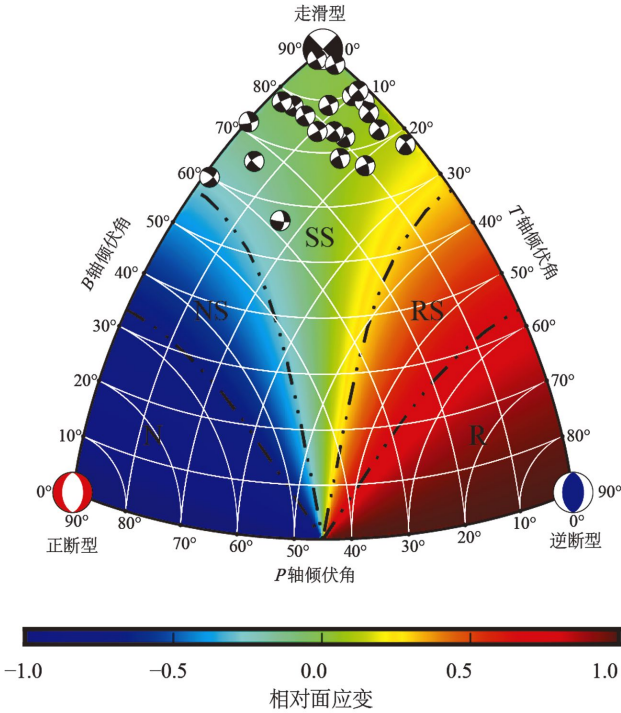


图 5 马尔康 6.0 级震群序列震源机制分类
Fig. 5 Focal mechanism classification of the Maerkang $M_s6.0$ earthquake swarm

矩张量转换为序列的整体走向、倾角、滑动角以及 *P*、*T*、*B* 轴的走向和倾伏角，从而得到总体震源机制。图 6 分别是序列中 3 次 5 级以上地震和序列其他地震事件总体震源机制的对比结果，可以看出结果差异不显著。表 2 列出了计算得到的序列其他地震总体震源机制的各项参数，可以看出与 3 次 5 级以上地震事件对应的序列其他地震事件总体震源机制类型均为走滑型，且与 5 级以上地震的最小三维空间旋转角较小，说明 3 次 5 级以上地震与序列其他地震的整体释放相对差别较小。

表 2 3 次 5 级以上地震以外其他地震事件总体震源机制特征

Tab. 2 Overall characteristics of the focal mechanisms of the seismic events excluding three $M_s \geq 5.0$ earthquakes														
地震事件	序列其他地震总体震源机制解/ (°)												两者最小 三维空间 旋转角/ (°)	
	节面 I			节面 II			P 轴		B 轴		T 轴			震源机 制类型
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	走向	倾伏角	走向	倾伏角	走向	倾伏角		
2022-06-10 00:03:24 5.8 级	59.64	89.02	-176.86	329.58	86.86	-0.98	284.65	2.91	76.95	86.71	184.57	1.53	走滑	15.36
2022-06-10 01:28:34 6.0 级	237.51	87.67	163.90	328.18	73.91	2.42	283.95	9.63	49.49	73.74	191.71	12.98	走滑	14.55
2022-06-10 03:27:00 5.2 级	238.14	89.99	174.01	328.14	84.01	0.01	283.29	4.22	58.02	84.01	192.98	4.24	走滑	12.16

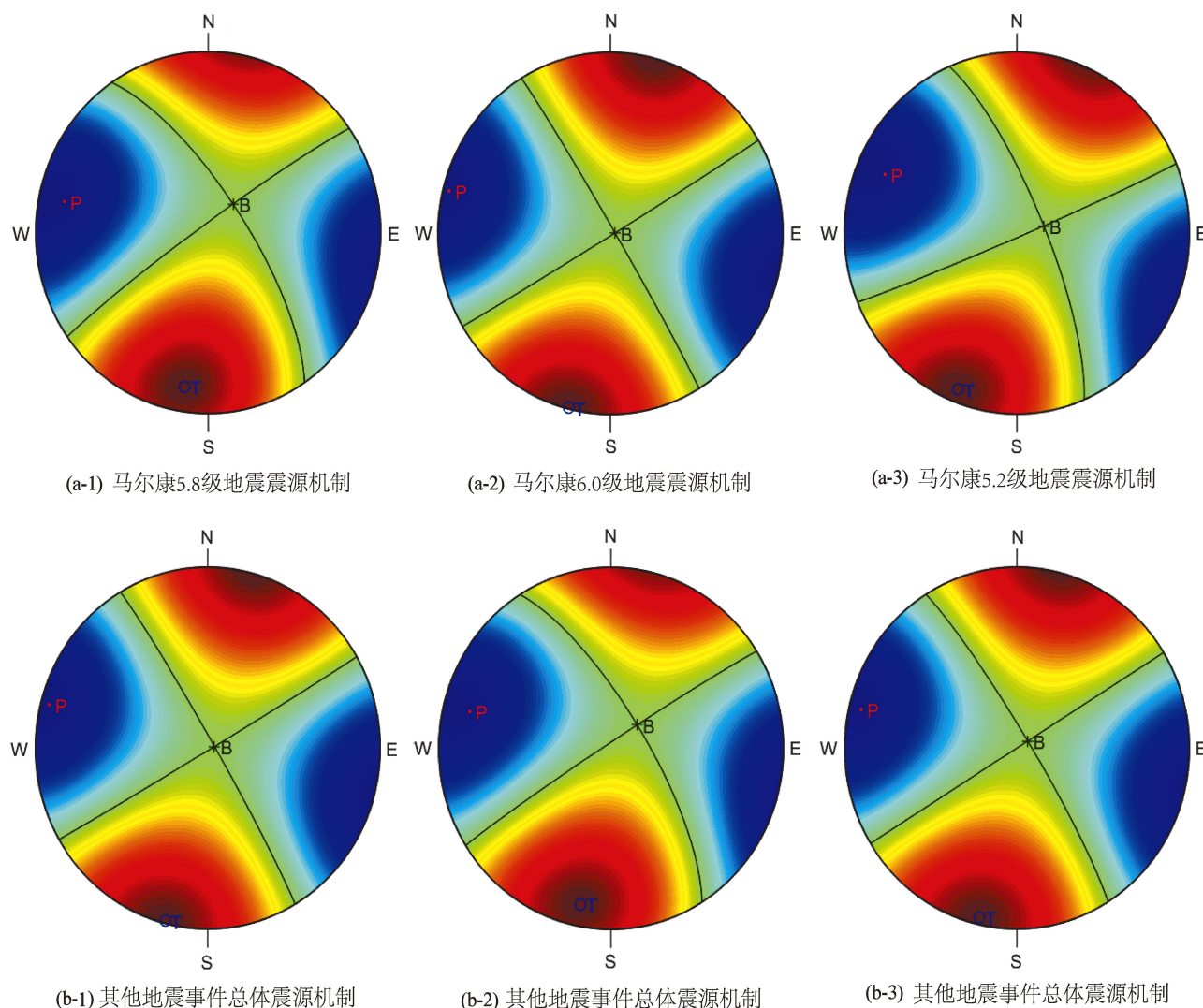


图6 3次5级以上地震震源机制 (a) 和对应的其他地震事件总体震源机制特征分析 (b)

Fig. 6 Characteristic analysis of focal mechanism of three $M_s \geq 5.0$ earthquakes (a) and the overall focal mechanism of other seismic events (b)

图7是本文计算所得的马尔康6.0级震群序列22次地震震源机制解的节面和力轴参数玫瑰图。节面走向呈现两个优势方位为NNW向和NE向,以NNW向为主。节面倾角变化集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$,显示序列具有高倾角特征,断层面近直立;滑动角分布在 0° 和 180° 附近,表明马尔康地震序列震源性质以走滑为主。 P 轴优势方位为NW-SE向,倾伏角在 15° 以内,近似水平; T 轴优势方位NNE-SSW向,倾伏角在 20° 以内,也接近水平,表明马尔康地震序列活动主要受区域NW-SE向水平挤压应力场控制。由于印度板块NNE向的推挤,青藏高原物质向东挤出,

遇到稳定的华南地块的阻挡,高原东南部物质转向SE方向,继而向南运动(王闯昭等,2008)。崔子健等(2019)用小震震源机制反演了青藏高原东部—南北地震带的区域构造应力场,认为受块体运动的控制,南北地震带的应力场方向自南向北发生了顺时针旋转,最大主应力方向由NW向逐渐转变为近EW向,再旋转至NE向,甚至近NS向,且绝大多数地区最大主应力仰角近水平。此次马尔康震群位于巴颜喀拉块体东部、南北地震带中段附近,崔子健等(2019)在该区域附近的研究结果与本文计算的马尔康震群序列的 P 轴优势方位基本一致。

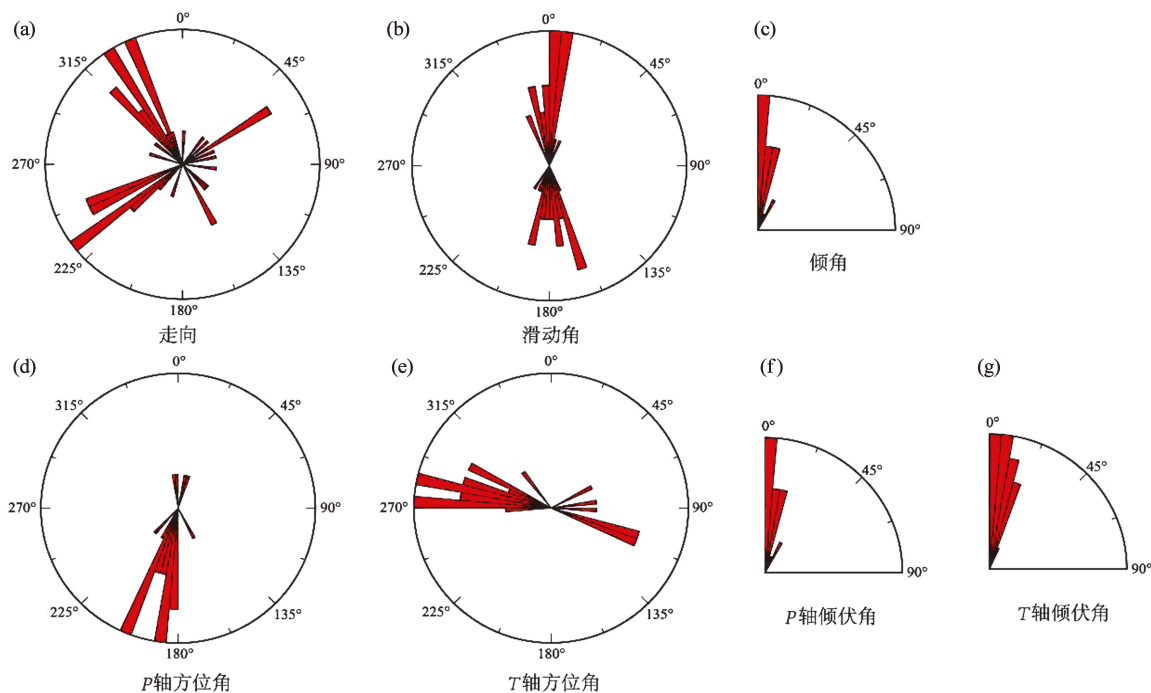


图7 马尔康6.0级震群序列震源机制解节面走向 (a)、滑动角 (b)、倾角 (c) 与 P 、 T 轴方位角、倾角统计 (d~g)

Fig. 7 Statistics of strike (a), rake (b), dip (c), azimuth and plunge of P -axis and T -axis (d~g) of the $M_s \geq 6.0$ earthquake swarm

4 讨论

杜方等 (2022) 采用多阶段定位方法对马尔康震群序列进行重定位, 并结合震源机制解和区域构造研究了震群序列的时空特征, 结果显示马尔康震群属于多断层面触发性震群, 震群包含的3次5级地震是发生在不同断裂的破裂事件。马尔康6.0级震群序列整体展布于松岗断裂和其分支断裂的北东侧, 以3次5级以上地震为代表形成了3个条带分布, 勾勒出3条断层破裂, 显示出松岗断裂北东侧的3条更次一级断裂活动 (图8)。5.8级和6.0级地震位于松岗断裂及其分支断裂北东侧的NNW走向的两条断裂面上, 是两次左旋走滑的破裂事件, 其中6.0级地震相对5.8级地震向NE方向偏移。5.2级地震再向SE方向偏移, 分布于NE走向的断裂面上, 为右旋走滑的破裂事件。根据上述研究结果, 对于5.8级和6.0级地震, 推断NNW向的节面I为发震断层面; 对于5.2级地震, 推断NE走向的节面II为发震断层面。本文统计得出的序列节面走向呈现两个优势方位: NNW向和

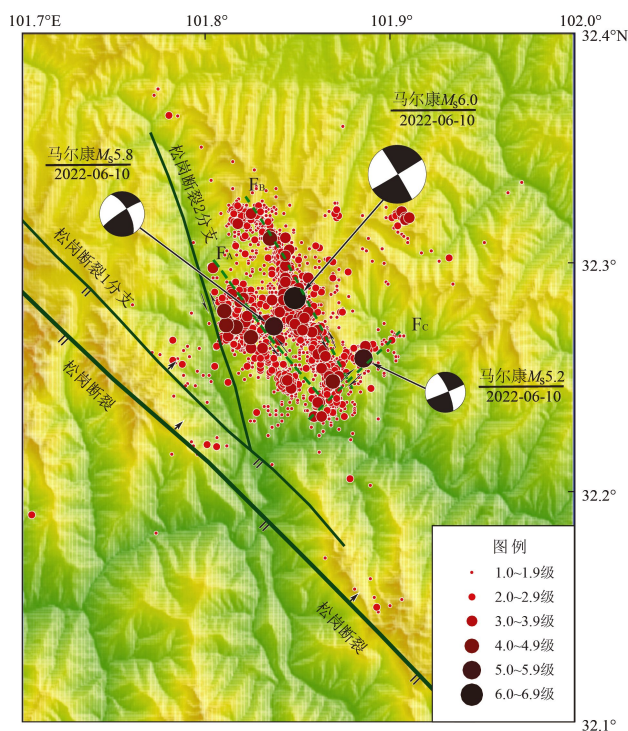


图8 马尔康6.0级震群序列重定位结果 (据杜方等, 2022 修改)

Fig. 8 Relocation of the Ma'erkang $M_s 6.0$ earthquake sequence (according to Du *et al.*, 2022)

NE 向, 这应该也与震源区存在 3 个不同走向的断层面有关。

5 结论

本文对马尔康 6.0 级震群序列 22 次地震震源机制进行反演, 初步得到以下结论:

(1) 采用全波形矩张量反演得到马尔康 6.0 级震群 5.8 级、6.0 级和 5.2 级地震矩震级分别为 $M_w 5.58$ 、 $M_w 5.89$ 和 $M_w 5.18$, 矩心深度均为 7 km, 三者震源机制性质一致, 均为走滑型。序列震源机制结果显示, 反演矩心深度主要集中在 (7 ± 2) km, 与这 3 次地震深度较为接近。采用震源机制水平应变花面应变的地震震源机制分类方法进行分, 得到序列地震全部为走滑型, 与这 3 次地震一致性较高。

(2) 3 次 5 级以上地震震源机制均与序列其他地震总体震源机制结果较为一致, 说明这 3 次地震与序列其他地震整体释放相对差别较小。 P 轴优势方位为 NNW – SEE 向, T 轴优势方位 NNE – SSW 向, 两者倾伏角均在 20° 以内, 接近水平, 表明马尔康震群序列活动主要受区域 NNW – SEE 向水平挤压应力场控制。

(3) 5.8 级和 6.0 级地震 NNW 向的节面 I 为发震断层面, 为左旋走滑的破裂事件; 5.2 级地震 NE 走向的节面 II 为发震断层面, 为右旋走滑的破裂事件。马尔康震群序列呈现两个优势走向, 分别为 NNW 向和 NE 向, 以 NNW 向为主, 这应该也与震源区存在 3 个不同走向的断层面有关。序列倾角变化集中在 $70^\circ \sim 90^\circ$, 具有高倾角特征; 滑动角分布在 0° 和 180° 附近, 表明马尔康地震序列的 3 个发震断层均以走滑错动为主, 断层面近似直立。

本文使用了中国地震台网中心的波形数据、美国内华达大学 Ichinose 教授的全波形矩张量反演软件、万永革研究员提供的 FMclass 软件, 参考了四川省地震局杜方研究员的序列重定位结果, 两位审稿人为本文的修改提出了宝贵的意见和建议, 在此一并表示感谢。

参考文献:

陈君贤, 韩竹军, 程捷. 2021. 小江断裂带南段新寨盆地新构造运动特征[J]. 华南地震, 41(3): 82 – 91.

- Chen J X, Han Z J, Cheng J. 2021. Characteristics of neotectonic movement in Xinzhai basin in the southern section of Xiaojiang fault zone [J]. South China Journal of Seismology, 41 (3): 82 – 91. (in Chinese)
- 陈俊磊, 郑勇, 张路, 等. 2020. 基于分频波形拟合方法的鲁甸 $M_s 6.5$ 地震序列震源机制解研究[J]. 地球物理学报, 63(4): 1472 – 1483.
- Chen J L, Zheng Y, Zhang L, et al. 2020. Focal mechanism solutions of the 2014 Ludian $M_s 6.5$ earthquake sequence derived from multiple – bandwidth waveform fitting[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63 (4): 1472 – 1483. (in Chinese)
- 程佳, 刘杰, 甘卫军, 等. 2011. 1997 年以来巴颜喀拉块体周缘强震之间的黏弹性触发研究[J]. 地球物理学报, 54(8): 1997 – 2010.
- Cheng J, Liu J, Gan W J, et al. 2011. Coulomb stress interaction among strong earthquakes around the Bayan Har block since the Manyi earthquake in 1997 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 54 (8): 1997 – 2010. (in Chinese)
- 崔子健, 陈章立, 王勤彩, 等. 2019. 南北地震带区域构造应力场反演[J]. 地震学报, 41(2): 219 – 229.
- Cui Z J, Chen Z L, Wang Q C, et al. 2019. Inversion for regional tectonic stress field in the North – South Seismic Belt of China [J]. Acta Seismologica Sinica, 41(2): 219 – 229. (in Chinese)
- 邓起东, 高翔, 陈桂华, 等. 2010. 青藏高原昆仑—汶川地震系列与巴颜喀喇断块的最新活动[J]. 地学前缘, 17(5): 163 – 178.
- Deng Q D, Gao X, Chen G H, et al. 2010. Recent tectonic activity of Bayankala fault – block and the Kunlun – Wenchuan earthquake series of the Tibetan Plateau [J]. Earth Science Frontiers, 17 (5): 163 – 178. (in Chinese)
- 杜方, 龙锋, 梁明剑, 等. 2022. 触发多断层面破裂的 2022 年四川马尔康 $M_s 6.0$ 震群特征[J]. 四川地震, (4): 1 – 10.
- Du F, Long F, Liang M J, et al. 2022. Characteristics of the Ma'erkang $M_s 6.0$ earthquake – swarm triggered along multiple fault planes in 2022 [J]. Earthquake Research in Sichuan, (4): 1 – 10. (in Chinese)
- 李平恩, 廖力, 奉建州, 等. 2019. 1900 年以来巴颜喀拉块体应力演化与周缘强震关系的数值模拟研究[J]. 地球物理学报, 62(11): 4170 – 4188.
- Li P E, Liao L, Feng J Z, et al. 2019. Numerical simulation of relationship between stress evolution and strong earthquakes around the Bayan Har block since 1900 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(11): 4170 – 4188. (in Chinese)
- 刘雷, 李玉江, 朱良玉, 等. 2021. 1947 年达日 $M 7.7$ 地震对巴颜喀拉块体边界断裂应力影响的数值模拟[J]. 地球物理学报, 64(7): 2221 – 2231.
- Liu L, Li Y J, Zhu L Y, et al. 2021. Influence of the 1947 Dari $M 7.7$ earthquake on stress evolution along the boundary fault of the Bayan Har block: insights from numerical simulation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(7): 2221 – 2231. (in Chinese)
- 任俊杰, 徐锡伟, 张世民, 等. 2017. 东昆仑断裂带东端的构造转换与 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震孕震机制[J]. 地球物理学报, 60 (10): 4027 – 4045.

- Ren J J, Xu X W, Zhang S M, *et al.* 2017. Tectonic transformation at the eastern termination of the Eastern Kunlun fault zone and seismogenic mechanism of the 8 August 2017 Jiuzhaigou $M_s 7.0$ earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 60(10): 4027–4045. (in Chinese)
- 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.
- Wan Y G. 2019. Determination of center of several focal mechanisms of the same earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(12): 4718–4728. (in Chinese)
- 万永革. 2022. 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/OL]. 地球科学. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html>.
- Wan Y G. 2022. Focal mechanism classification based on areal strain of the horizontal strain rosette of focal mechanism and characteristic analysis of overall focal mechanism of the earthquake sequence[J/OL]. Earth Science. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.p.20220715.1532.014.html>. (in Chinese)
- 王闯昭, 王恩宁, 沈正康, 等. 2008. 基于GPS资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 582–597.
- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, *et al.* 2008. GPS constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan–Yunnan region, China[J]. Science China Earth sciences, 38(5): 582–597. (in Chinese)
- 王宇玺, 官悦. 2021. 地震震源参数特征研究[J]. 华南地震, 41(4): 85–90.
- Wang Y X, Gong Y. 2021. Study on the characteristics of seismic source parameters in Muli area[J]. South China Journal of Seismology, 41(4): 85–90. (in Chinese)
- 闻学泽, 杜方, 张培震, 等. 2011. 巴颜喀拉块体北和东边界大地震序列的关联性与2008年汶川地震[J]. 地球物理学报, 54(3): 706–716.
- Wen X Z, Du F, Zhang P Z, *et al.* 2011. Correlation of major earthquake sequences on the northern and eastern boundaries of the Bayan Har block, and its relation to the 2008 Wenchuan earthquake[J]. Chinese Journal of Geophysics, 54(3): 706–716. (in Chinese)
- 闻学泽. 2018. 巴颜喀拉块体东边界千年破裂历史与2008年汶川、2013年芦山和2017年九寨沟地震[J]. 地震学报, 40(3): 255–267.
- Wen X Z. 2018. The 2008 Wenchuan, 2013 Lushan and 2017 Jiuzhaigou earthquakes, Sichuan, in the last more than one thousand years of rupture history of the eastern margin of the Bayan Har block[J]. Acta Seismologica Sinica, 40(3): 255–267. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2019. 2019年6月17日四川长宁 $M_s 6.0$ 地震序列震源机制解与发震构造分析[J]. 地球物理学报, 62(9): 3432–3447.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2019. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 17 June 2019 $M_s 6.0$ Sichuan Changning earthquake sequence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(9): 3432–3447. (in Chinese)
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑, 等. 2020. 四川盆地荣县—威远—资中地区发震构造几何结构与构造变形特征: 基于震源机制解的认识和启示[J]. 地球物理学报, 63(9): 3275–3291.
- Yi G X, Long F, Liang M J, *et al.* 2020. Geometry and tectonic deformation of seismogenic structures in the Rongxian–Weiyuan–Zizhong region, Sichuan Basin: insights from focal mechanism solutions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(9): 3275–3291. (in Chinese)
- 易桂喜, 赵敏, 龙锋, 等. 2021. 2021年9月16日四川泸县 $M_s 6.0$ 地震序列特征及孕震构造环境[J]. 地球物理学报, 64(12): 4449–4461.
- Yi G X, Zhao M, Long F, *et al.* Characteristics of the seismic sequence and seismogenic environment of the $M_s 6.0$ Sichuan Luxian earthquake on September 16, 2021[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(12): 4449–4461. (in Chinese)
- 张建勇, 王新, 陈凌, 等. 2022. 基于余震重定位和震源机制解研究青海玛多 $M_s 7.4$ 地震序列的发震构造和断裂形态[J]. 地球物理学报, 65(2): 552–562.
- Zhang J Y, Wang X, Chen L, *et al.* 2022. Seismotectonics and fault geometries of the Qinghai Madoi $M_s 7.4$ earthquake sequence: insight from aftershock relocations and focal mechanism solutions[J]. Chinese Journal of Geophysics, 65(2): 552–562. (in Chinese)
- 赵韬, 赵曦, 王莹, 等. 2016. 区域台网地震矩张量快速反演系统研究[J]. 地震学报, 38(6): 889–897.
- Zhao T, Zhao X, Wang Y, *et al.* 2016. Study on the fast seismic moment tensor inversion system using regional seismic network data[J]. Acta Seismologica Sinica, 38(6): 889–897. (in Chinese)
- Dreger D S, Helmberger D V. 1993. Determination of source parameters at regional distances with single station or sparse network data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 98(B5): 8107–8125.
- Fukuyama E, Ishida M, Dreger D S, *et al.* 1998. Automated seismic moment tensor determination by using on-line broadband seismic waveforms[J]. Jishin, 51(51): 149–156.
- Ichinose G A, Anderson J G, Smith K D, *et al.* 2003. Source parameters of eastern California and western Nevada earthquakes from regional moment tensor inversion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 93(1): 61–84.
- Jia K, Zhou S Y, Zhuang J C, *et al.* 2021. Stress transfer along the western boundary of the Bayan Har Block on the Tibet Plateau from the 2008 to 2020 Yutian earthquake sequence in China[J]. Geophysical Research Letters, 48(15), e2021GL094125.
- Kawakatsu H. 1998. On the realtime monitoring of the long-period seismic wavefield[J]. Bulletin of the Earthquake Research Institute University of Tokyo, 73(3–4): 267–274.
- Tajima F, Megnin C, Dreger D S, *et al.* 2002. Feasibility of real-time broadband waveform inversion for simultaneous moment tensor and centroid location determination[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 92(2): 739–750.
- Wang C Y, Herrmann R B. 1980. A numerical study of P, SV and SH wave generation in a plane layered medium[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 70(4): 1015–1036.

The Characteristics of the Focal Mechanisms of the Ma'erkang $M_s6.0$ Earthquake Sequence in 2022

WANG Ying, JIN Zhaodi, ZHAO Tao

(*Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China*)

Abstract

In this paper, the focal mechanism solutions of 22 events of the Ma'erkang $M_s6.0$ earthquake sequence were obtained with the method of full – waveform moment tensor inversion. The results show that these 22 earthquakes are strike – slip ones, and the trend of their fault plane is mainly in NNW direction and NE direction. The dip angle of the fault plane is approximately vertical, and the slip angle is close to 0° or 180° . The azimuth of the P – axis is in NWW – SEE direction, and the plunge angle is close to horizontal. This indicates that the activity of the Ma'erkang $M_s6.0$ earthquake sequence is mainly compressed in NWW – SEE direction by the regional horizontal stress field. The focal mechanisms of the three $M_s \geq 5.0$ earthquakes are slightly different from the focal mechanisms of other earthquakes in the sequence. According to the results of precise location, we believe that the Ma'erkang $M_s6.0$ earthquake sequence is triggered by multiple planes. The three $M_s \geq 5.0$ earthquakes were caused by different faults. The strike of the fault planes of the $M_s5.8$ and the $M_s6.0$ earthquake are in NNW direction; the rupture of the planes is right – lateral and strike – slip. The strike of the fault plane of the $M_s5.2$ earthquake is in NE direction; its rupture is left – lateral and strike – slip. The fault planes of the three earthquakes are approximately vertical.

Keywords: the Ma'erkang $M_s6.0$ earthquake swarm; focal mechanism solution; moment tensor inversion; earthquake sequence; seismogenic structure