

黄浩,袁伏全,李丽,等.2023.2022年青海德令哈 $M_s6.0$ 地震序列重定位及发震背景分析[J].地震研究,46(4):473-482,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0050.

Huang H, Yuan F Q, Li L, et al. 2023. Earthquake relocation and seismic tectonic background of the 2022 Delingha $M_s6.0$ earthquake sequence[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(4):473-482, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0050.

2022年青海德令哈 $M_s6.0$ 地震序列重定位及 发震背景分析*

黄浩¹,袁伏全^{1*},李丽²,赵燕杰¹,万玉杰¹,马建新¹,李启雷¹,胡维云¹,郭瑛霞¹

(1.青海省地震局,青海西宁810017;2.山西省地震局,山西太原030021)

摘要:2022年1月23日、3月26日和4月15日青海省德令哈市分别发生 $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震。采用CAP方法反演了 $M_s6.0$ 地震及6次 $M_s\geq 3.7$ 地震的震源机制解和震源矩心深度,利用双差定位方法重新定位了德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的震源位置,初步分析了德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的发震背景。震源机制结果显示, $M_s6.0$ 地震震源机制解节面I:走向 174° /倾角 80° /滑动角 -156° ,节面II:走向 79° /倾角 66° /滑动角 -11° ,矩心深度6 km。地震重定位结果显示,德令哈 $M_s6.0$ 地震序列震中呈NS向展布、震源区北部为主体破裂区域。基于震源机制解、地震重定位结果和震源区附近局部发育NS向构造的特征,分析认为德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的发震构造为一条NS向、高倾角的右旋走滑隐伏断层。

关键词:德令哈地震;地震重定位;震源机制;发震背景;青海

中图分类号:P315.72 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-0666(2023)04-0473-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0050

0 引言

据中国地震台网测定,2022年3月26日青海省海西州德令哈市(38.50°N , 97.33°E)发生 $M_s6.0$ 地震,震源深度10 km。2022年1月23日和4月15日德令哈分别发生 $M_s5.8$ 和 $M_s5.4$ 地震,这3次地震余震区破裂贯通,并构成了一个震群型地震序列(下文简称德令哈 $M_s6.0$ 地震序列)。截至2022年5月29日,德令哈 $M_s6.0$ 地震序列共发生 $M_s\geq 3.0$ 地震13次,其中 $M_s3.0\sim 3.9$ 地震7次, $M_s4.0\sim 4.9$ 地震3次, $M_s5.0\sim 5.9$ 地震2次, $M_s6.0\sim 6.9$ 地震1次。德令哈 $M_s6.0$ 地震序列为祁连—海原断裂带发生

2022年1月9日 $M_s6.9$ 地震后,短期内再次发生的震群型地震序列。受限于区域地震监测能力,该地震序列的初始定位结果揭示的余震展布特征与区域构造的NW—SE走向特征存在较明显差异; $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震初始定位的震中位置具有由南向北迁移的特征,余震是否存在由南向北的破裂特征对该地区未来地震危险性判断较为重要;德令哈 $M_s6.0$ 地震的震源机制为走滑型,而区域历史地震震源机制多数为逆冲型。这些特征表明德令哈 $M_s6.0$ 地震相对复杂,而且震源区没有已探明的断裂构造,因此有必要对德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的发震背景进行深入研究。

CAP方法的优势是反演结果对速度结构和地壳横向差异不敏感,具有较高的稳定性。前人的研究结果(吕坚等,2008;郑勇等,2009;龙锋

* 收稿日期:2022-06-23.

基金项目:中国地震局地震科技星火计划(XH21036Y);山西省应用基础研究计划面上青年基金项目(201901D211549);青海省地震科学基金(2021A02,2022C01).

第一作者简介:黄浩(1987-),高级工程师,主要从事数字地震活动性研究.E-mail:hh175@sina.com.

✉ 通讯作者简介:袁伏全(1982-),高级工程师,主要从事综合地震预测研究.E-mail:26092846@qq.com.

等, 2010; 易桂喜等, 2012; 祁玉萍等, 2018; Jiang *et al.*, 2019; 黄浩, 付虹, 2019; Lei *et al.*, 2019, 2020; 袁伏全等, 2021) 表明, CAP 方法在反演震源机制解和确定震源深度方面具有明显优势。该方法使用体波和面波联合反演, 将宽频带数字地震记录分为体波部分 (Pn1) 和面波部分, 采用频率-波数方法 ($F-K$) (Zhu, Rivera, 2002) 计算台站的格林函数, 利用格林函数得到合成地震图, 反演过程中体波和面波分别赋予不同的权重, 通过格点搜索方法在空间搜索, 拟合、反演地震事件的最佳震源机制解。该方法分别对体波和面波进行拟合, 减小了地壳速度模型及地壳横向不均匀性对反演结果的影响。双差定位方法可以较好地解决速度模型的不确定性引起的误差, 在许多中强地震的余震序列定位中得到了广泛应用 (杨智娴等, 2003; 黄媛等, 2008; 房立华等, 2011; 王未来等, 2014, 2021; 王勤彩等, 2015; 龙锋等, 2021)。

本文采用 CAP 方法反演 2022 年德令哈 $M_s 6.0$ 地震及部分波形质量较好的 $M_s \geq 3.7$ 地震的震源机制解和震源矩心深度, 利用中国地震台网中心“地震编目系统”的正式观测报告的震相到时数据, 采用双差定位方法对德令哈 $M_s 6.0$ 地震序列进行重定位, 获得较为准确的震源参数, 并结合地质构造对德令哈 $M_s 6.0$ 地震的发震背景进行了初步分析。

1 区域地质构造背景

柴达木—祁连地块位于青藏高原向北扩展的前缘部位, 由阿尔金断裂、东昆仑断裂和河西走廊带等围限为一级块体, 块体内部进一步划分为柴达木和祁连 2 个二级地块 (徐锡伟等, 2014)。GPS 速度场所揭示的地壳运动变形模式表明, 柴达木—祁连地块地壳运动具有大范围内弥散变形特征, 块体变形场为不同断裂差异性相对运动、区域内部逆冲挤压和块体旋转共同作用的结果 (葛伟鹏等, 2013)。

2022 年德令哈 $M_s 6.0$ 地震震中位于青藏高原东北缘祁连地块中部 (图 1), 震中附近区域历史上发生 13 次 $M_s \geq 6.0$ 地震, 其中 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震 12 次, $M_s 7.0 \sim 7.9$ 地震 1 次, 最大历史地震为 1932 年 12 月 25 日甘肃玉门昌马 $M_s 7.6$ 地震。

2022 年德令哈 $M_s 6.0$ 地震震中 100 km 范围内发生过 1927 年 3 月 16 日青海哈拉湖东 6 级地震、1930 年 7 月 14 日青海哈拉湖东 $6\frac{1}{2}$ 级地震、2003 年 4 月 17 日青海德令哈 $M_s 6.6$ 地震、2008 年 11 月 10 日青海海西 $M_s 6.3$ 地震和 2009 年 8 月 28 日青海海西 $M_s 6.4$ 地震, 表明该区域具有较强的构造运动和孕震能力。

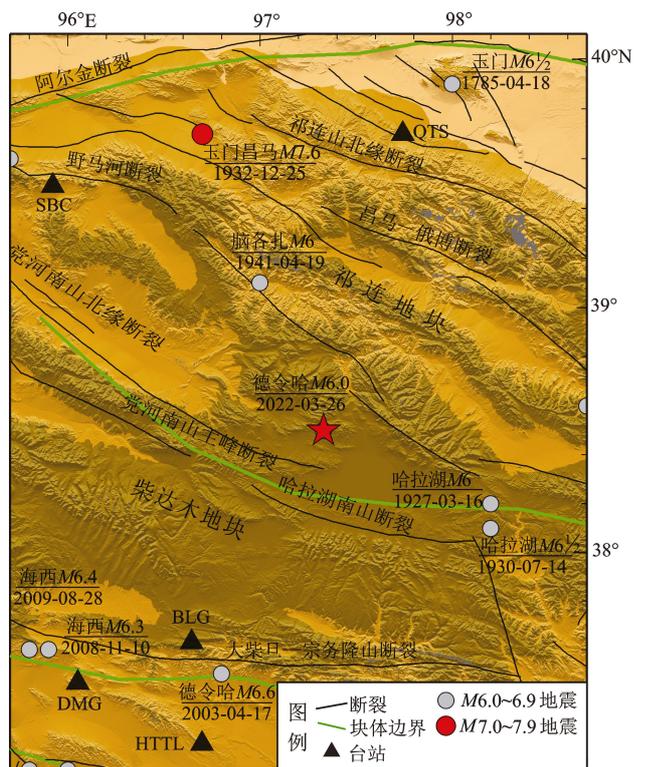


图 1 研究区构造背景与 $M \geq 6.0$ 历史地震震中分布
Fig. 1 Regional tectonic settings and epicenters of $M \geq 6.0$ historical earthquakes in the study area

德令哈 $M_s 6.0$ 地震距南侧的党河南山主峰断裂约 26 km。党河南山主峰断裂和疏勒南山断裂地区因自然条件恶劣, 对它们的研究程度较低 (苏琦等, 2016; 郑文俊, 2009; 赵朋等, 2009)。党河南山北缘断裂呈 NW 向展布, 长约 190 km, 第四纪以来活动强烈, 以挤压逆冲为主 (苏琦等, 2016; 邵延秀等, 2011a, b; 赵朋等, 2009)。疏勒南山断裂总体走向 NW、倾向 NE、倾角 60° 左右 (苏琦等, 2016), 野外地质调查判定断裂性质为左旋走滑兼逆冲 (郑文俊, 2009)。

疏勒河地区构造总体呈 NW-SE 向展布, 局部发育近 NS 向构造。疏勒河地区中新生代以来经历了 6 个构造变形期次, 其构造演化与青藏高原

NE 缘阶段性隆升具有良好的对应性：印支运动 II 幕，在近 N-S 向的挤压下，崩坤沟—扎尔马格褶皱冲断带形成就位，表现为右旋逆冲运动，由于右旋走滑和基底地层的影响，在崩坤沟—扎尔马格主逆冲断层北缘形成“Z”型褶皱及南北向构造叠加（童馗，2016）。

2 震源机制解

2.1 方法与资料

本文参考前人在德令哈地区开展的人工地震测深研究结果（Zhao *et al.*, 2013；王有学等，2000，2005），建立了德令哈地区的一维地壳速度模型（表1）。基于青海和甘肃区域地震台网的波形数据（郑秀芬等，2009），选用距离震中 30 ~ 350 km 范围内的地震台站，使用 CAP 方法（Zhao, Helmberger, 1994；Zhu, Helmberger, 1996）反演了德令哈 $M_s6.0$ 地震及部分 $M_s \geq 3.7$ 地震的震源机制解，反演时采用表1所示的初始速度模型。本文对观测到的速度波形记录处理过程如下：①去均值及消除仪器响应；②将两水平分量分别旋转到 R 、 T 分量；③积分为位移；④滤波；⑤重采样时采样率为 1 s，与格林函数保持一致。反演 $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震时，体波与面波的带通滤波频段分别为 0.05 ~ 0.15 Hz 和 0.05 ~ 0.1 Hz；反演余震时，体波与面波带通滤波频段分别为 0.05 ~ 0.2 Hz 和 0.05 ~ 0.1 Hz。

表1 初始地壳速度结构
Tab.1 Crustal velocity model

上界面深度/km	0	4	18	29	42	58
P波速度/($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.90	5.90	6.25	6.62	6.74	6.74

2.2 震源机制解结果

$M_s5.8$ 地震震源矩心深度为 8 km（图2a），矩震级 $M_w5.5$ ，震源机制解节面 I 走向为 171° 、倾角为 84° 、滑动角为 -146° ；节面 II 走向为 77° 、倾角为 56° 、滑动角为 -7° ； P 轴仰角 28° 、方位 169° ； T 轴仰角 19° 、方位 69° ； P 、 T 轴仰角较接近水平。 $M_s6.0$ 地震震源矩心深度为 6 km（图2b），矩震级 $M_w5.7$ ，震源机制解节面 I 走向为 174° 、倾角为 80° 、滑动角为 -156° ；节面 II 走向为 79° 、倾角为 66° 、滑动角为 -11° ； P 轴仰角 24° 、方位 39° ； T 轴仰角 9° 、方位 305° ； P 、 T

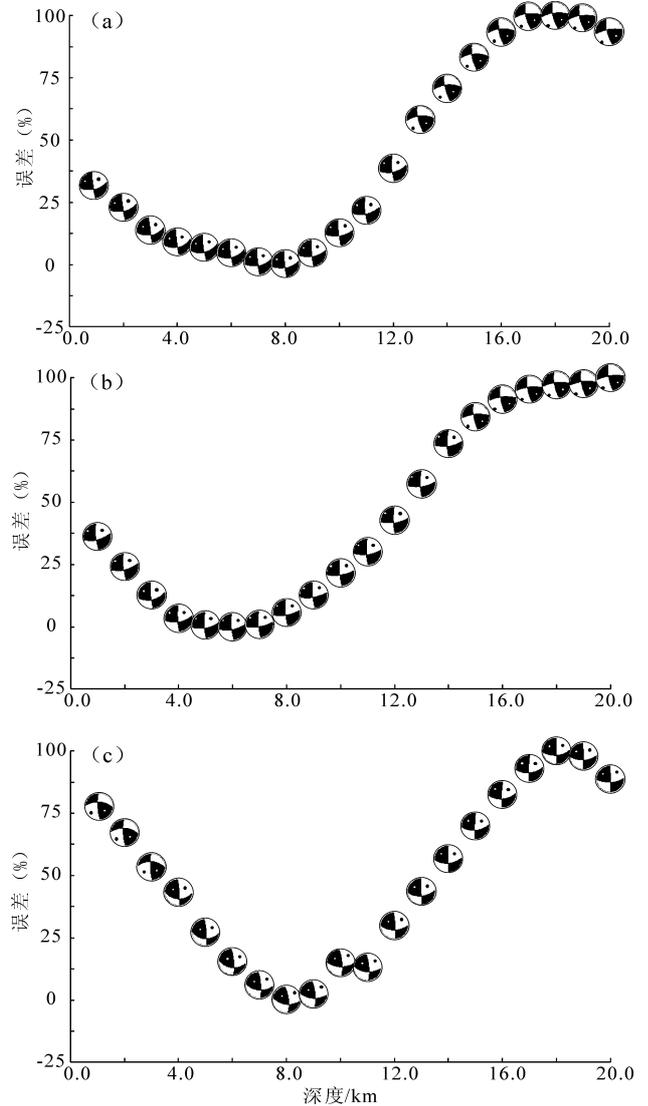


图2 德令哈 $M_s5.8$ (a)、 $M_s6.0$ (b) 和 $M_s5.4$ 地震 (c) 矩张量反演中波形拟合误差随深度的变化

Fig. 2 The fitting error of the moment tensor inversion varying with the focal depth of the Delingha $M_s5.8$ (a), $M_s6.0$ (b) and $M_s5.4$ (c) earthquakes

轴仰角较接近水平。 $M_s5.4$ 地震震源矩心深度为 8 km（图2c），矩震级 $M_w5.1$ ，震源机制解节面 I 走向为 99° 、倾角为 50° 、滑动角为 26° ；节面 II 走向为 352° 、倾角为 70° 、滑动角为 137° ； P 轴仰角 13° 、方位 50° ； T 轴仰角 44° 、方位 307° ； P 轴仰角较接近水平、 T 轴仰角相对较高。图3展示了 $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震最佳拟合深度处台站理论波形和实际波形拟合情况，图中波形上方数字为互相关系数百分比，下方数字为对应时间偏

移 (s), 左侧台站名上方数字为震中距 (km) 和方位角 ($^{\circ}$), 其下方数字为相对偏移时间。从图 3

中可以看出, 理论波形和实际波形具有较好的拟合关系。

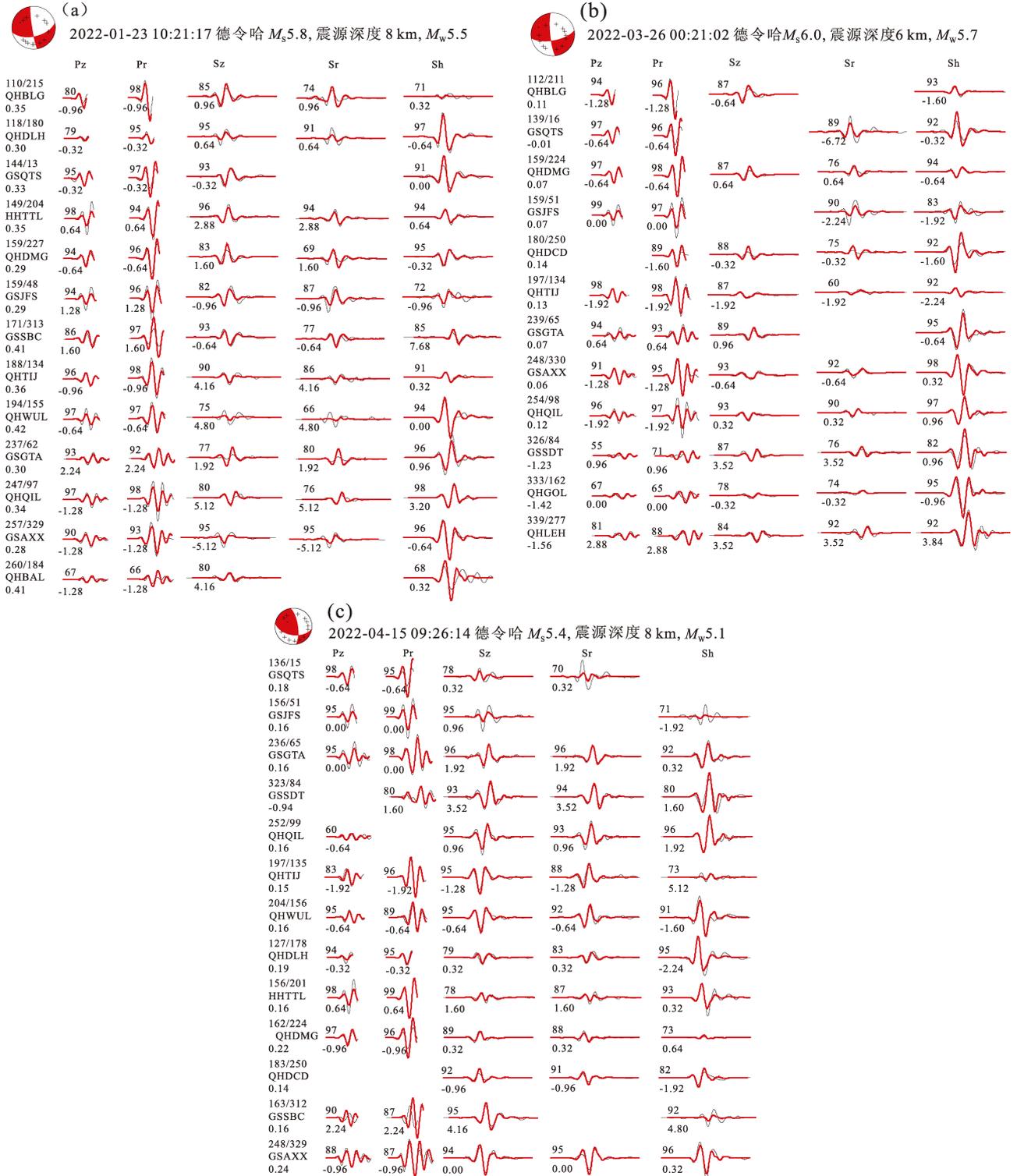


图 3 德令哈 $M_s 5.8$ (a)、 $M_s 6.0$ (b) 和 $M_s 5.4$ (c) 地震双力偶机制解及理论 (红色) 和实际 (黑色) 波形对比

Fig. 3 Double-coupled source mechanism solutions and comparison between the theoretical (red) and observed (black) waveforms of the Delingha $M_s 5.8$ (a), $M_s 6.0$ (b) and $M_s 5.4$ (c) earthquakes

国内外研究机构给出了德令哈 $M_s 5.8$ 、 $M_s 6.0$ 和 $M_s 5.4$ 地震的震源机制解，本文得出的震源机制解与中国地震局地球物理研究所（CEA-IGP）

或全球矩心矩张量项目（GCMT）得出的震源机制解较接近（表2），表明本文结果具有较高的可靠性。

表2 不同机构得出的德令哈 $M_s 5.8$ 、 $M_s 6.0$ 和 $M_s 5.4$ 地震震源机制解

Tab. 2 Focal mechanisms and focal depths of the Delingha $M_s 5.8$, $M_s 6.0$, $M_s 5.4$ earthquakes provided by different institutes

地震事件	节面 I / (°)			节面 II / (°)			M_w	矩心深度 / km	来源
	走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角			
$M_s 5.8$	169	74	-173	77	83	-16	5.6	18.4	GCMT
	181	62	-157	80	70	-30	5.5	4	CEA-IGP
	171	84	-146	77	56	-7	5.5	8	本文
$M_s 6.0$	173	84	-175	82	85	-6	5.8		GCMT
	170	90	-166	80	76	0	5.7	5	CEA-IGP
	174	80	-156	79	66	-11	5.7	6	本文
$M_s 5.4$	93	76	14	359	76	166	5.2	25.1	GCMT
	99	50	26	352	70	137	5.1	8	本文

注：GCMT 为全球矩心矩张量项目；CEA-IGP 为中国地震局地球物理研究所。

德令哈 $M_s 6.0$ 地震后早期余震波形受主震影响较大。本文利用 CAP 方法计算了德令哈 $M_s 6.0$ 地震序列中 6 次 $M_s \geq 3.7$ 地震的震源机制解（图4、表3）。震源机制结果显示余震的震源机制均为走滑类型，表明余震的破裂类型与 $M_s 5.8$ 、 $M_s 6.0$ 和 $M_s 5.4$ 地震较为一致。

1976 年以来，德令哈 $M_s 6.0$ 地震震中及邻区 $M_s \geq 5.0$ 地震的震源机制解显示，绝大多数地震为逆冲类型，仅 2004 年德令哈 $M_s 5.2$ 地震和 2019 年德令哈 $M_s 5.0$ 地震为走滑类型（图4）。2004 年德令哈 $M_s 5.2$ 地震震中位于 2003 年德令哈 $M_s 6.6$ 地震震中余震区，其走滑类型可能与其震源区应力调整有关；2019 年德令哈 $M_s 5.0$ 地震震中位于德令哈 $M_s 6.0$ 震源区北端，其震源机制类型与 2022 年德令哈 $M_s 6.0$ 地震及余震较为一致，均为走滑类型，这与区域历史地震震源机制以逆冲类型为主存在明显差异。孟文等（2022）给出的区域构造应力场显示，最大主压应力轴 σ_1 的方位角为 63.2° 、倾伏角为 54.9° ；最大主张应力轴 σ_3 的方位角为 -55.5° 、倾伏角为 18.6° 。本文基于震源区的震源机制解结果（表3），采用线性阻尼应力场反演法得到震源区的局部应力场（图5），最大主压应力轴 σ_1 的方位角为 55° 、倾伏角为 31° ；最大主张应力轴 σ_3 的方位角为 311° 、倾伏角为 22° 。震源区局部应力场与区域构造应力场较为一致，显示 2022 年德令哈 $M_s 6.0$ 地震序列受印度板块 NE 向

推挤作用控制，其震源机制与历史地震震源机制的差异可能由构造本身性质差异引起。

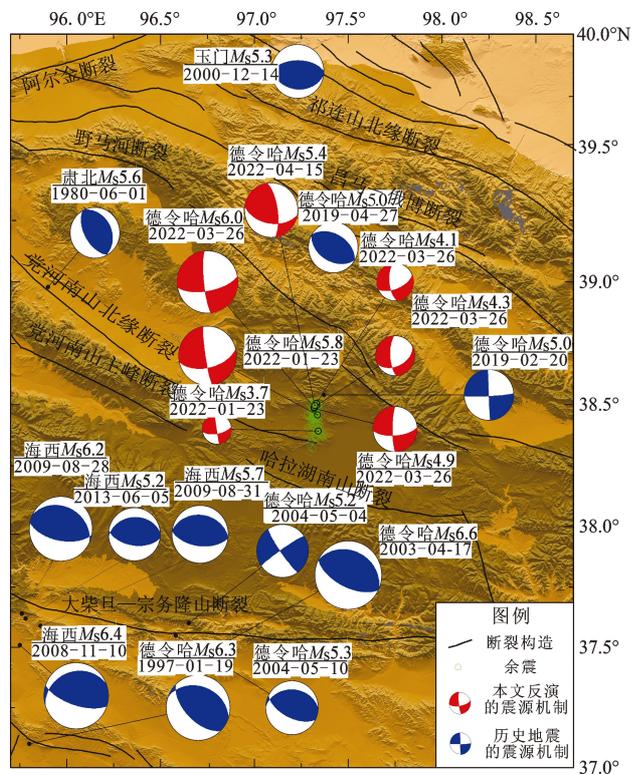


图4 德令哈 $M_s 6.0$ 地震、部分 $M_s \geq 3.7$ 地震及震中区 1970 年以来 $M_s \geq 5.0$ 地震震源机制解

Fig. 4 Focal mechanism solutions of the Delingha $M_s 6.0$ earthquake and some $M_s \geq 3.7$ aftershocks and $M_s \geq 5.0$ earthquakes in epicenter area since 1970

表3 德令哈 $M_s 6.0$ 地震及部分 $M_s \geq 3.7$ 地震震源机制解

Tab. 3 Focal mechanism solutions of the Delingha $M_s 6.0$ earthquake and some $M_s \geq 3.7$ aftershocks

序号	发震时间	发震位置		M_w	拟合深度/ km	节面 I / (°)			节面 II / (°)		
		$\lambda_E / (^\circ)$	$\varphi_N / (^\circ)$			走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角
1	2022-01-23 10:21:17	97.37	38.44	5.8	8	171	84	-146	77	56	-7
2	2022-01-23 11:58:51	97.35	38.40	3.7	6	171	88	-154	80	64	-2
3	2022-03-26 00:21:02	97.33	38.50	6.0	6	174	80	-156	79	66	-11
4	2022-03-26 00:28:40	97.34	38.47	4.3	7	177	69	-131	65	45	-30
5	2022-03-26 01:05:08	97.34	38.51	4.1	11	174	64	-146	68	60	-30
6	2022-03-26 02:50:03	97.37	38.47	4.9	9	180	80	-156	86	66	-11
7	2022-04-15 09:26:14	97.33	38.52	5.4	8	99	50	26	352	70	137

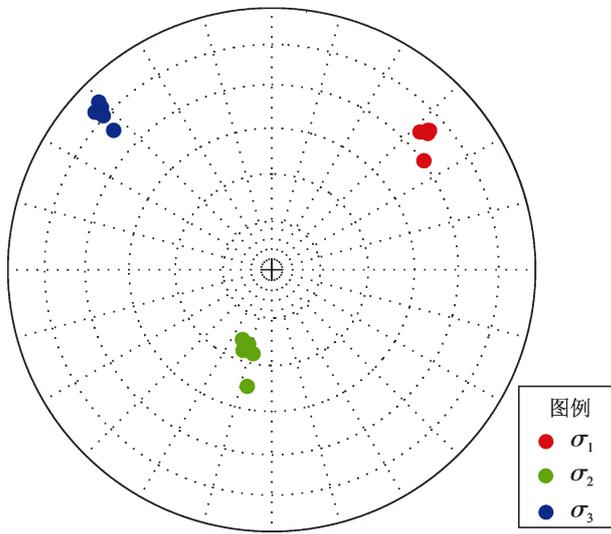


图5 德令哈 $M_s 6.0$ 地震震源区应力场反演的力轴投影
Fig. 5 The projection of the principal axes of the stress field inverted from the focal mechanism solutions in the epicentral area of the Delingha $M_s 6.0$ earthquake

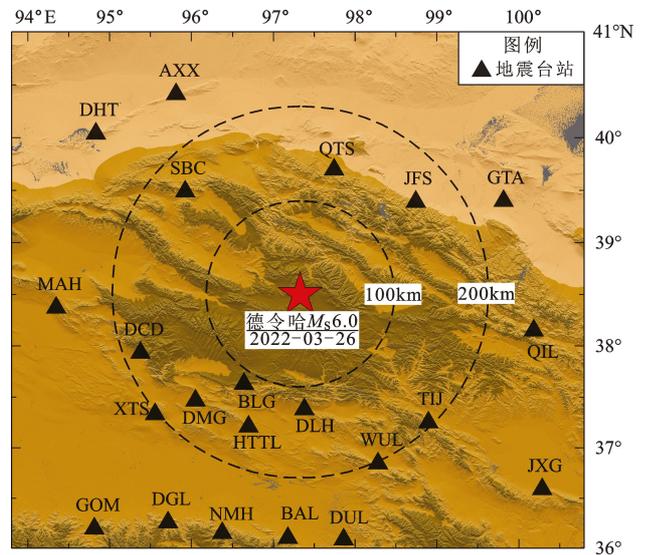


图6 德令哈 $M_s 6.0$ 地震震中周围的台站分布
Fig. 6 Distribution of the seismic stations around the epicenter of the Delingha $M_s 6.0$ earthquake

3 德令哈 $M_s 6.0$ 地震序列重定位

3.1 方法与资料

本文采用双差定位方法 (Waldhauser, Ellsworth, 2000) 对德令哈 $M_s 6.0$ 地震序列进行重定位。震相走时数据来源于青海区域地震台网的正式观测报告, 选取2022年1月23日—4月23日以德令哈 $M_s 5.8$ 地震为中心、半径30 km 范围内3个以上台站记录到的291次地震事件。其中, P波震相走时资料共3 136条, S波震相走时资料共1 558条。涉及的地震台站共有22个(图6、表4), 且这些台站相对于德令哈 $M_s 5.8$ 和 $M_s 6.0$ 地震序列具有较好的空间分布, 为地震重定位提供了充足

地震事件观测报告。地震重定位采用的地壳速度模型见表1, 波速比取为1.72 (杨志高, 张雪梅, 2016)。

3.2 重定位结果

在进行双差定位时, 对P波数据权重设为1.0, S波数据权重设为0.5; 设定地震对之间的最大距离不超过10 km, 最小连接数设为6。在计算过程中采用共轭梯度法求解方程, 经过3轮共15次迭代后得到阻尼最小二乘法解, 期间不断调整迭代参数, 使得表征双差方程条件数的CND在40~60, 迭代结束时双差数据的平均震源改变量(DX、DY、DZ、DT)分别从1 671、1 180、1 765 m和172 ms减小为60、59、118 m和8 ms, 在接受误差范围之内, 表明迭代过程趋于稳定合理。

表4 图6中的台站代码及其对应的台站名称
Tab.4 Stations and their codes marked in Figure 6

台站代码	台站名称	台站代码	台站名称	台站代码	台站名称
AXX	安西台	DMG	大煤沟台	MAH	马海台
BAL	巴隆台	DUL	都兰台	NMH	诺木洪台
BLG	巴力沟台	GTA	高台台	QIL	祁连台
DCD	大柴旦台	GOM	格尔木台	QTS	青头山台
DGL	大格勒台	HTTL	怀头他拉台	SBC	石包城台
DHT	敦煌台	JFS	金佛寺台	TIJ	天峻台
DLH	德令哈台	JXG	江西沟台	WUL	乌兰台
				XTS	锡铁山台

经过计算, 最终获得了德令哈 $M_s6.0$ 地震序列 234 次地震的重定位结果, 重定位率达到 80%。重定位后地震的离散度较初始定位 (图 7a) 明显降低, 显示出明显的 NS 向展布特征 (图 7b); 德令哈 $M_s5.8$ 地震震中位于震源区中北部, $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震震中距离较近, 位于震源区北部; 震源区北部余震分布相对密集, 而震源区南部余震较稀疏, 震源区与党河南山主峰断裂交汇贯通 (图 7b); 震源区余震随时间演化显示, 余震总体上具有由南向北迁移的特征。对比重定位前后的震源深度分布 (图 8) 可知, 重定位前震源深度集中分布在 6~11 km, 重定位后震源深度在 9 km 左右优势分布, 左右两侧呈对称形态。

震源深度以 DD' 剖面为界其南北两侧具有较明显差异, 在震源区北部分布范围为 3~18 km, 南部为 7~13 km (图 9a), 表明震源区北部破裂区域相对较大、为主体破裂区域; BB' 震源深度剖面显示 (图 9b), 其破裂面近乎直立, 震源深度优势

分布范围为 7~11 km, $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震位于剖面底部; 重定位给出的 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震的震源深度分别为 15.6 和 17.0 km, CAP 方法给出的矩心深度分别为 6 和 8 km, 二者具有较明显差别; 重定位和 CAP 方法给出的深度结果分别代表初始破裂深度和震源矩心深度, 矩心深度的物理意义为地震破裂过程中的平均能量深度, 一般初始破裂深度要大于震源矩心深度; 震源深度优势分布范围 (7~11 km) 相对较浅, 可能代表了 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震在浅部破裂相对更充分, 因此震源矩心深度较初始破裂深度更浅。 CC' 震源深度剖面显示 (图 9c), 震源深度分布较均匀, $M_s5.8$ 地震位于余震区中部, 重定位给出的震源深度 (9.8 km), 与 CAP 方给出的矩心深度 (8 km) 较为接近; DD' 剖面 (图 9d)、 EE' 剖面 (图 9e) 和 FF' 剖面 (图 9f) 显示的震源深度特征较为相似, 震源深度集中分布在 7~13 km, 表明破裂区域相对较小。

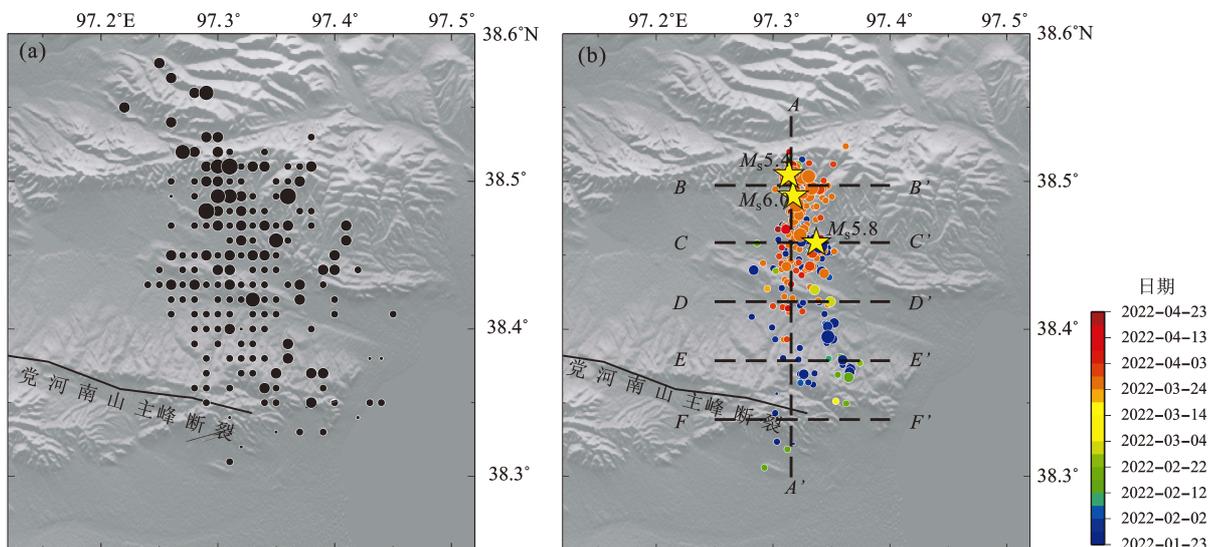


图7 德令哈 $M_s6.0$ 地震序列重定位前 (a)、后 (b) 的震中分布

Fig. 7 Epicenters of the Delingha $M_s6.0$ earthquake sequence before (a) and after (b) precise relocation

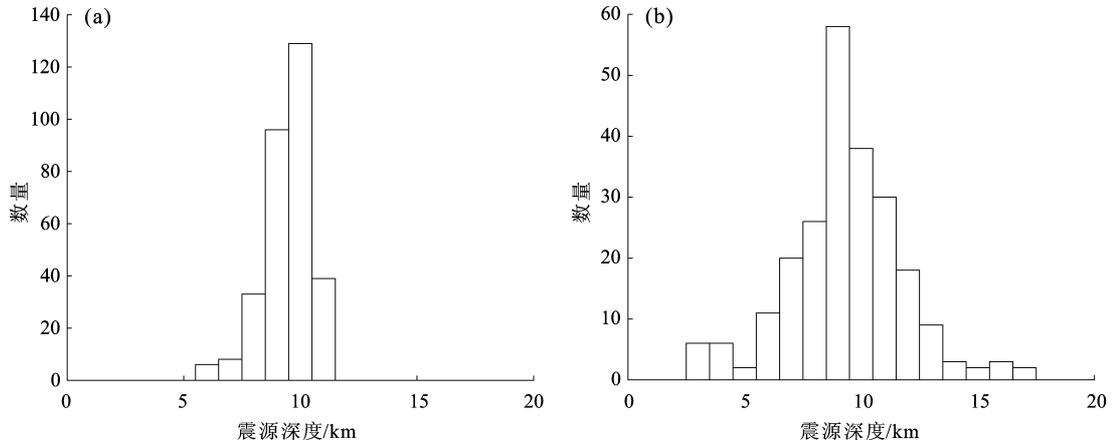


图 8 德令哈 $M_s6.0$ 地震序列重定位前 (a)、后 (b) 的震源深度分布图

Fig. 8 Focal depths of the Delingha $M_s6.0$ earthquake sequence before (a) and after (b) precise relocation

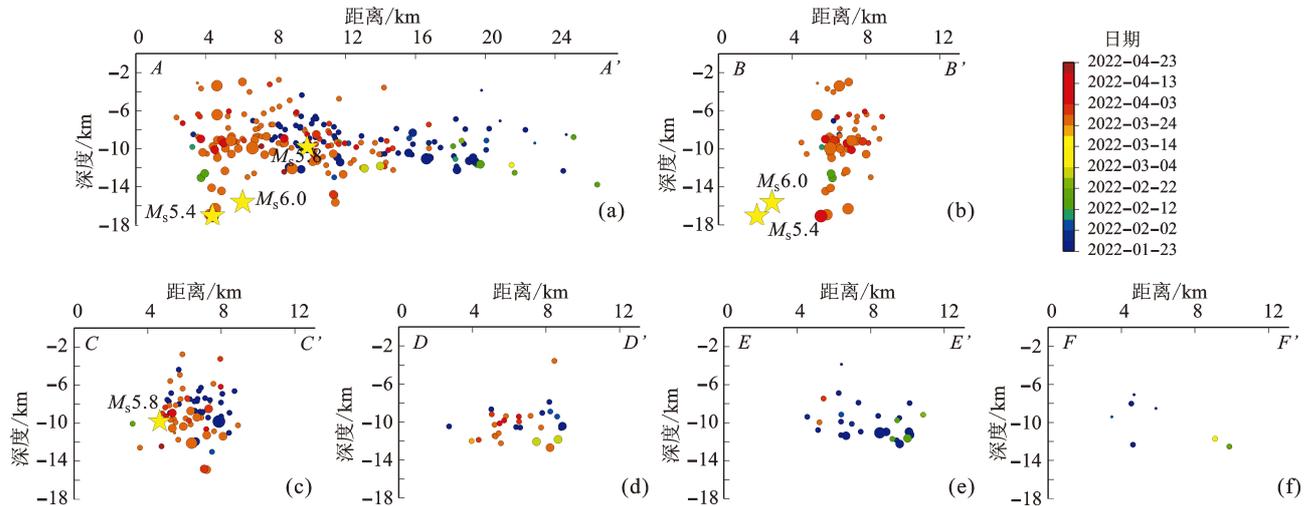


图 9 重定位后的德令哈 $M_s6.0$ 地震序列余震分别沿 AA' (a)、 BB' (b)、 CC' (c)、 DD' (d)、 EE' (e)、 FF' (f) 震源深度剖面图

Fig. 9 Distribution of depths of the Delingha $M_s6.0$ earthquake sequence along AA' profile (a), BB' profile (b), CC' profile (c), DD' profile (d), EE' profile (e) and FF' profile (f) after precise relocation

4 结论

本文对德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的震源机制、地震重定位和发震背景进行了研究, 得出以下主要结论:

(1) 德令哈 $M_s5.8$ 地震重定位的震源位置为 (38.455°N , 98.338°E), 震源深度为 9.5 km, CAP 方反演获得的矩心深度约 8 km, 最佳双力偶解节面 I 走向为 171° 、倾角为 84° 、滑动角为 -146° , 节面 II 走向为 77° 、倾角为 56° 、滑动角为 -7° 。 $M_s6.0$ 地震重定位的震源位置为 (34.490°N ,

97.313°E), 震源深度为 16.7 km, CAP 方反演获得的矩心深度约 6 km, 最佳双力偶解节面 I 走向为 174° 、倾角为 80° 、滑动角为 -156° , 节面 II 走向为 79° 、倾角为 66° 、滑动角为 -11° 。 $M_s5.4$ 地震重定位的震源位置为 (38.504°N , 97.313°E), 震源深度为 17.0 km, CAP 方反演获得的矩心深度约 8 km, 最佳双力偶解节面 I 走向为 99° 、倾角为 50° 、滑动角为 26° , 节面 II 走向为 352° 、倾角为 70° 、滑动角为 137° 。德令哈 $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震均为右旋走滑类型, 且震源机制解参数较接近。

(2) 重定位结果显示, 德令哈 $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$

和 $M_s5.4$ 余震破裂贯通,震源区沿 NS 向展布、长约 26 km,震源深度主要分布在 0~18 km。震源区余震随时间演化显示,总体上具有由南向北迁移的特征。震源区北部破裂区域相对较大, $M_s5.8$ 、 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震均发生在震源区北部,因此震源区北部为主体破裂区域。 BB' 震源深度剖面较清晰地揭示了发震破裂面近乎直立的特征,这与震源机制解给出的发震断层高倾角的特征一致。重定位给出的 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震的震源深度较 CAP 方法给出的矩心深度更深,而重定位给出的 $M_s5.8$ 地震的震源深度与 CAP 方法给出的矩心深度较一致,这可能与 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震的起始破裂点相对较深,而余震在浅部(7~11 km)优势分布揭示的 $M_s6.0$ 和 $M_s5.4$ 地震在浅部破裂相对充分有关。

(3) 2022年德令哈 $M_s6.0$ 地震序列重定位和震源机制结果揭示的发震断层特征具有较好的一致性, $M_s6.0$ 地震震源机制解节面 I 可视为发震断层,即走向约 174° 、倾角约 80° 、滑动角约 -156° 。震源区附近断裂构造走向多以 NW 为主、局部发育 NS 向构造,因此根据本文获得的重定位结果、震源机制结果、震源区地质构造情况,初步推断德令哈 $M_s6.0$ 地震序列的发震构造为一条 NS 向、高倾角的右旋走滑隐伏断层。2022年德令哈 $M_s6.0$ 地震序列震中 NS 向展布特征和走滑型震源机制与区域 NW 向构造和逆冲型历史地震震源机制存在较大差异,这种差异在德令哈地区并非首次发现,如 2013 年德令哈 $M_L4.5$ 震群,其震中即为近 NS 向展布,震源机制为走滑类型(姚家骏等, 2014)。因此,德令哈地区主要构造附近局部发育 NS 向构造可能并不罕见,对这一现象的深入研究还需依赖野外地质调查的研究结果。

中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”为本研究提供了地震波形数据,云南省地震局王光明提供了绘图帮助,在此表示衷心的感谢!

参考文献:

房立华,吴建平,张天中,等. 2011. 2011年云南盈江 $M_s5.8$ 地震及其余震序列重定位[J]. 地震学报,32(2):262-267.
葛伟鹏,王敏,沈正康,等. 2013. 柴达木—祁连山地块内部震间上地壳块体运动特征与变形模式研究[J]. 地球物理学报,56(9):2994-3010.

黄浩,付虹. 2019. 小湾水库库区蓄水前后构造应力场的变化特征[J]. 地震地质,41(6):1413-1428.
黄媛,吴建平,张天中,等. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究[J]. 中国科学:地球科学,38(10):1242-1249.
龙锋,祁玉萍,易桂喜,等. 2021. 2021年5月21日云南漾濞 $M_s6.4$ 地震序列重新定位与发震构造分析[J]. 地球物理学报,64(8):2631-2646.
龙锋,张永久,闻学泽,等. 2010. 2008年8月30日攀枝花—会理 6.1 级地震序列 $M_L \geq 4.0$ 事件的震源机制解[J]. 地球物理学报,53(12):2852-2860.
吕坚,郑勇,倪四道,等. 2008. 2005年11月26日九江—瑞昌 $M_s5.7$ 、 $M_s4.8$ 地震的震源机制解与发震构造研究[J]. 地球物理学报,51(1):158-164.
孟文,郭祥云,李永华,等. 2022. 青藏高原东北缘构造应力场及动力学特征[J]. 地球物理学报,65(9):3229-3251.
祁玉萍,张致伟,龙锋,等. 2018. 大凉山次级块体及邻区震源机制解与区域应力场特征分析[J]. 地震地质,40(2):377-395.
邵延秀,袁道阳,曹娜,等. 2011a. 北祁连山—河西走廊大震危险区预测[J]. 地震地质,33(4):865-876.
邵延秀,袁道阳,雷中生,等. 2011b. 党河南山北缘断裂古地震形变带特征研究[J]. 震灾防御技术,6(4):427-435.
苏琦,袁道阳,谢虹,等. 2016. 祁连山西段疏勒河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质,38(2):240-258.
童旭. 2016. 中祁连南缘疏勒河地区中—新生代构造特征及构造演化[D]. 成都:成都理工大学.
王勤彩,王中平,张金川,等. 2015. 2010年4月玉树 $M_s7.3$ 地震序列的断层结构[J]. 球物理学报,58(6):1931-1940.
王未来,房立华,吴建平,等. 2021. 2021年青海玛多 $M_s7.4$ 地震序列精确定位研究[J]. 中国科学:地球科学,51(7):1193-1202.
王未来,吴建平,房立华,等. 2014. 2014年云南鲁甸 $M_s6.5$ 地震序列的双差定位[J]. 地球物理学报,57(9):3042-3051.
王有学,Walter D Mooney,韩果花,等. 2005. 台湾—阿尔泰地学断面阿尔金—龙门山剖面的地壳纵波速度结构[J]. 地球物理学报,48(1):98-106.
王有学,钱辉. 2000. 青海东部地壳速度结构特征研究[J]. 地学前缘,7(4):568-579.
徐锡伟,程佳,许冲,等. 2014. 青藏高原块体运动模型与地震活动主体地区讨论:鲁甸和景谷地震的启示[J]. 地震地质,36(4):1116-1134.
杨志高,张雪梅. 2016. 2016年门源 $M_s6.4$ 地震震区地壳厚度及波速比研究[J]. 地震研究,39(4):566-573.
杨智娴,陈运泰,郑月军,等. 2003. 双差地震定位法在我国中西部地区地震精确定位中的应用[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):129-134.
姚家骏,马玉虎,赵燕杰,等. 2014. 2013年德令哈郊区 $M_L4.5$ 震群特征及发震背景研究[J]. 地震,34(4):118-126.
易桂喜,龙锋,张致伟. 2012. 汶川 $M_s8.0$ 地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报,55(4):1213-1227.
袁伏全,黄浩,蔡丽雯,等. 2021. 2019年甘肃夏河 $M_s5.7$ 地震震源机制解和震源深度确定[J]. 地震研究,44(4):521-528.
赵朋,闵伟,焦德成,等. 2009. 肃北野马河北侧断裂地貌特征及其晚第四纪活动性[J]. 地震地质,31(3):459-469.

- 郑文俊. 2009. 河西走廊及其邻区活动构造图像及构造变形模式 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- 郑秀芬, 欧阳飏, 张东宁, 等. 2009. “国家测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑 [J]. 地球物理学报, 52(5): 1412 – 1417.
- 郑勇, 马宏生, 吕坚, 等. 2009. 汶川地震强余震 ($M_s \geq 5.6$) 的震源机制解及其与发震构造的关系 [J]. 中国科学: 地球科学, 39(4): 413 – 426.
- Jiang J Z, Li J, Fu H. 2019. Seismicity analysis of the 2016 $M_s 5.0$ Yunnan earthquake, Yunnan, China and its tectonic implications [J]. Pure and Applied Geophysics, 176(3): 1225 – 1241.
- Lei X L, Su J R, Wang Z W. 2020. Growing seismicity in the Sichuan Basin and its association with industrial activities [J]. Science China Earth Sciences, 63(11): 1633 – 1660.
- Lei X, Z, Wang J S. 2019. The December 2018 $M_L 5.7$ and January 2019 $M_L 5.3$ earthquakes in South Sichuan Basin induced by shale gas hydraulic fracturing [J]. Seismological Research Letters, 90(3): 1099 – 1110.
- Waldhauser F, Ellsworth W L. 2000. A double – difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California [J]. Bull Seismol Soc Amer, 90(6): 1353 – 1368.
- Zhao J M, Jin Z J, Walter D. 2013. Crustal structure of the central Qaidam basin imaged by seismic wide – angle reflection/refraction profiling [J]. Tectonophysics, 584: 174 – 190.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source estimation from broadband regional seismograms [J]. Bull Seismol Soc Amer, 84(1): 91 – 104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in source estimation techniques using broadband regional seismograms [J]. Bull Seismol Soc Amer, 86(5): 1634 – 1641.
- Zhu L, Rivera L A. 2002. A note on the dynamic and static displacements from a point source in multilayered media [J]. Geophysical Journal International, 148(3): 619 – 627.

Earthquake Relocation and Seismic Tectonic Background of the 2022 Delingha $M_s 6.0$ Earthquake Sequence

HUANG Hao¹, YUAN Fuquan¹, LI Li², ZHAO Yanjie¹, WAN Yujie¹, MA Jianxin¹,
LI Qilei¹, HU Weiyun¹, GUO Yingxia¹

(1. Qinghai Earthquake Agency, Xining 810017, Qinghai, China)

(2. Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, Shanxi, China)

Abstract

A 5.8-magnitude, a 6.0-magnitude, and a 5.4-magnitude earthquake occurred respectively on Jan. 23, Mar. 26 and Apr. 15, 2022 in Delingha city of Qinghai province. We firstly inverted the focal mechanisms and the centroid depth of the source of the $M_s 6.0$ main shock and other 6 $M_s \geq 3.7$ aftershocks by the CAP method, then we relocated the sources of the $M_s 6.0$ earthquake sequence by the hypoDD method, and analyzed the characteristics of the focal mechanisms, the relocated source parameters and the seismogenic structure. The focal mechanism of the Delingha $M_s 6.0$ earthquake has 2 solutions: for the first nodal plane, strike is 174° , dip is 80° , rake is -156° . For the second nodal plane, strike is 79° , dip is 66° , rake is -11° . The centroid depth is 6 km. The sources of the $M_s 6.0$ earthquake sequence are mainly distributed in North-South direction. According to the focal mechanism, relocated source parameters, and the geological structure in the source region, the seismogenic structure of the $M_s 6.0$ earthquake sequence is a hidden fault with high dip angel in North-South direction.

Keywords: the Delingha earthquake; earthquake relocation; focal mechanism; seismic tectonic background; Qinghai