

孟令媛,解孟雨,臧阳,2022. 2022 年门源  $M_s$ 6.9 和 2016 年门源  $M_s$ 6.4 地震序列比较分析. 中国地震,38(1):1~11.

# 2022 年门源 $M_s$ 6.9 和 2016 年门源 $M_s$ 6.4 地震序列比较分析

孟令媛 解孟雨 臧阳

中国地震台网中心,北京 100045

**摘要** 2022 年 1 月 8 日青海省海北州门源县发生  $M_s$ 6.9 地震,震中距离 2016 年 1 月 21 日门源  $M_s$ 6.4 地震震中约 33km,两次门源地震均发生在冷龙岭断裂附近,但在震源机制、主震断层破裂过程及地震序列余震活动等方面显著不同。针对两次门源地震序列的比较分析,对研究冷龙岭断裂及其附近区域强震序列和余震衰减特征等具有重要研究意义。通过对比分析 2022 年门源  $M_s$ 6.9 地震和 2016 年门源  $M_s$ 6.4 地震余震的时空演化特征,发现二者在震源过程和断层破裂尺度上存在明显差异,前者发震断层破裂充分,震后能量释放充分,余震丰富且震级偏高;而后者发震断层未破裂至地表,余震震级水平偏低。综合分析两次门源地震序列表现出来的差异性,认为其可能与地震发震断层的破裂过程密切相关,且同时受到区域构造环境的影响。

**关键词:** 门源  $M_s$ 6.9 地震 门源  $M_s$ 6.4 地震 冷龙岭断裂 余震活动

[文章编号] 1001-4683(2022)01-0001-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

据中国地震台网测定,2022 年 1 月 8 日 1 时 45 分青海省海北州门源县发生  $M_s$ 6.9 地震,震中位置  $37.77^\circ\text{N}$ ,  $101.26^\circ\text{E}$ ,震源深度 10km,此次地震位于青藏高原东北缘祁连山地震带托莱山断裂、冷龙岭断裂的阶区部位,构造较为复杂。2016 年 1 月 21 日 1 时 13 分青海门源发生  $M_s$ 6.4 地震,震中位置  $37.68^\circ\text{N}$ ,  $101.62^\circ\text{E}$ ,震源深度 10km,该地震位于 2022 年门源  $M_s$ 6.9 地震东侧约 33km 处,震中位于冷龙岭断裂附近(邓起东,2007;徐锡伟等,2016;姜文亮等,2017;韩立波,2022;李智敏等,2022)。

2022 年门源  $M_s$ 6.9 地震是继 2016 年门源  $M_s$ 6.4 地震后祁连山地震带发生的又一次强烈地震。祁连山地震带位于昆仑山和柴达木盆地北侧,河西走廊盆地及阿尔金断裂以南,长约 1000km,宽约 300km,具有高坡度、高陡度的造山带边缘山系及高海拔、低起伏山间盆地发育的地貌特征(张会平等,2012)。

祁连山地震带位于青藏高原东北缘北部,是青藏高原向 NE 方向扩展生长的前缘地区之一,晚新生代到现今的构造变形强烈、区域内地震活跃,历史上曾发生过多次 7 级以上地

[收稿日期] 2022-02-28 [修定日期] 2022-03-15

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH22012YC、XH22011YA、XH20072)共同资助

[作者简介] 孟令媛,女,1983 年生,研究员,主要从事地震活动和地震危险方面的研究。E-mail:menglingyuan@seis.ac.cn

震,包括1654年天水 $M_s$ 8.0、1879年武都 $M_s$ 8.0、1920年海原 $M_s$ 8.5、1927年古浪 $M_s$ 8.0和1932年昌马 $M_s$ 7.6地震(侯康明等,1998、1999;郑文俊等,2009;Guo et al,2019a、2019b、2020;鞠慧超,2020)。

本文主要针对2022年门源 $M_s$ 6.9和2016年门源 $M_s$ 6.4地震的序列演化特征进行比较分析和讨论,基于震源机制及主震发震断层破裂过程,分析两次门源地震在震源过程中所表现出的显著差异。初步对比研究结果显示,2022年门源地震矩震级高、主震发震断层破裂至地表且地震能量释放充分,2016年门源地震矩震级低、主震发震断层破裂不充分,两个地震序列余震数量、震级水平差异明显。

## 1 发震构造及震源特征

2022年门源 $M_s$ 6.9地震和2016年门源 $M_s$ 6.4地震震中均位于冷龙岭断裂附近(邓起东,2007),两次地震的余震沿冷龙岭断裂分布且密集区相接(图1)。冷龙岭断裂东起甘肃省天祝县,经红崖岷、闸渠河进入青海省境内,至门源-祁连公路的八道班以西为止,全长近130km,总体走向 $N60^\circ W \sim N70^\circ W$ ,倾向NE,倾角 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。冷龙岭断裂北侧为走廊过渡带,南侧为中祁连隆起带,东端与古浪断裂及毛毛山断裂相接,西端与托莱山断裂相连,由一组近于平行的次级断裂组成,断裂带宽1~3km(何文贵等,2000、2010;姜文亮,2018)。

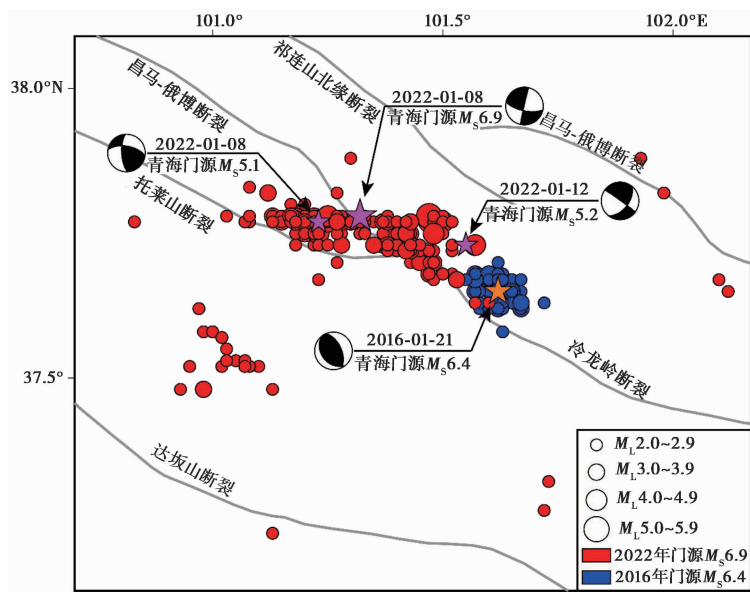


图1 2022年1月8日门源 $M_s$ 6.9地震(截至2022年2月7日)和2016年1月21日门源 $M_s$ 6.4地震(截至2016年2月20日)主震位置及余震分布

中国地震台网中心给出的2022年门源 $M_s$ 6.9地震震源机制解反演结果显示(支明等,2022),此次地震矩震级为 $M_w$ 6.6,断层节面I走向 $193^\circ$ ,倾向 $89^\circ$ ,滑动角 $-159^\circ$ ;节面II走向 $102^\circ$ ,倾向 $69^\circ$ ,滑动角 $-2^\circ$ ,波形拟合质心深度为11km,分析认为此次地震为一次走滑型破裂的地震事件。2016年门源 $M_s$ 6.4地震矩震级为 $M_w$ 5.9,震源机制结果显示,断层节面I

走向  $335^\circ$ , 倾向  $56^\circ$ , 滑动角  $97^\circ$ ; 节面 II 走向  $143^\circ$ , 倾角  $35^\circ$ , 滑动角  $80^\circ$ , 波形拟合质心深度为  $8\text{km}$ , 推断该地震为一次逆冲型的地震事件<sup>①</sup>。两次门源地震的震源机制解结果与全球大地震矩心矩张量解 (GCMT) 公布的地震矩张量反演结果较为一致 (表 1)。

表 1 2022 年门源  $M_s6.9$  地震和 2016 年门源  $M_s6.4$  地震震源参数

震例	矩震级	深度 /km	走向/倾角/滑动角 节面 I /( $^\circ$ )	走向/倾角/滑动角 节面 II /( $^\circ$ )	地震矩 /( $\text{N}\cdot\text{m}$ )	信息来源
2022 年门源 $M_s6.9$ 地震	$M_w6.6$	11	193/89/-159	102/69/-2		文明等 (2022)
	$M_w6.7$	14.8	14/89/172	104/82/1	$1.23\times 10^{26}$	GCMT <sup>②</sup>
2016 年门源 $M_s6.4$ 地震	$M_w5.9$	8	335/56/97	143/35/80		文明等 (2022)
	$M_w5.9$	14.3	335/47/96	146/43/83	$9.19\times 10^{24}$	GCMT <sup>②</sup>

2022 年门源  $M_s6.9$  地震和 2016 年门源  $M_s6.4$  地震震中距离约  $33\text{km}$ , 两个地震序列的余震区均沿冷龙岭断裂密集分布且相接, 但门源  $M_s6.9$  地震的余震分布范围沿破裂的尺度明显长于门源  $M_s6.4$  地震, 且前者震源机制为走滑型, 而后者震源机制则为逆冲型为主的破裂 (图 1, 表 1)。

2022 年门源  $M_s6.9$  地震发生后, 张勇等<sup>③</sup> 给出了该地震发震断层层面位移分布图及破裂过程 (图 2(a)), 由图 2(a) 可见, 2022 年门源地震主发震断层破裂较为充分, 沿走向双侧破裂  $30\sim 40\text{km}$ , 沿倾向破裂超过  $15\text{km}$ , 且出露至地表, 与野外考察结果一致 (韩竹军等, 2022; 韩帅等, 2022; 潘家伟等, 2022)。2016 年门源  $M_s6.4$  地震则以单侧破裂为主, 沿走向破裂集中在震中一侧约  $10\text{km}$  范围内, 沿倾向破裂集中在  $5\sim 15\text{km}$  范围内且未出露至地表, 此外主发震断层面上破裂逆冲特征较为明显, 整个区域呈现不规则的圆形分布 (图 2(b)) (郑绪君等, 2018)。

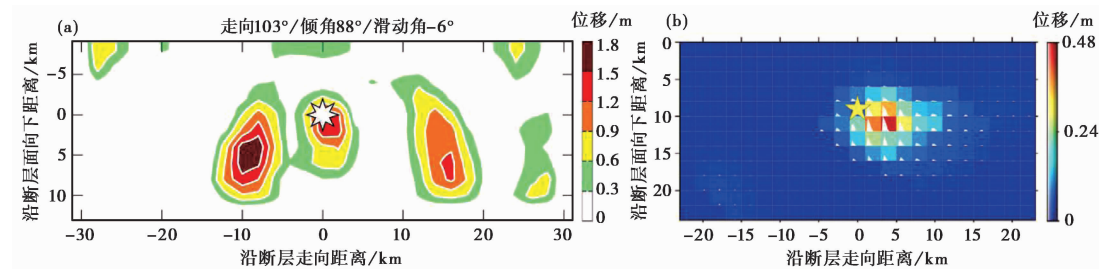


图 2 2022 年门源  $M_s6.9$  (a)<sup>③</sup> 和 2016 年门源  $M_s6.4$  地震 (b) (郑绪君等, 2018) 发震断层面上滑动位移分布

## 2 门源 $M_s6.9$ 和门源 $M_s6.4$ 地震序列

截至 2022 年 2 月 7 日, 门源  $M_s6.9$  地震余震区共记录  $M_L \geq 1.0$  余震 2266 次, 其中

① <https://data.earthquake.cn/index.html>

② <http://www.globalemt.org>

③ 张勇等, 2022. 私人通讯.

$M_L$ 1.0~1.9 地震 1877 次,  $M_L$ 2.0~2.9 地震 325 次,  $M_L$ 3.0~3.9 地震 51 次,  $M_L$ 4.0~4.9 地震 10 次,  $M_L$ 5.0~5.9 地震 3 次, 最大余震为 1 月 12 日 18 时 20 分  $M_L$ 5.7(  $M_S$ 5.2 )地震(表 2)。

表 2 2022 年门源  $M_S$ 6.9 地震序列目录(  $M_L \geq 4.0$  )

编号	发震时刻 (年-月-日 T时:分:秒)	震中位置		震级		震源深度/km
		北纬/(°)	东经/(°)	$M_L$	$M_S$	
1	2022-01-08T01:45:28	37.78	101.32	7.1	6.9	7
2	2022-01-08T01:55:19	37.77	101.27	4.4	4.1	7
3	2022-01-08T02:09:05	37.77	101.23	5.3	5.1	7
4	2022-01-08T02:33:53	37.77	101.27	4.1	3.4	7
5	2022-01-08T04:45:23	37.75	101.23	4.1	3.3	7
6	2022-01-08T10:06:21	37.77	101.47	4.1	3.4	7
7	2022-01-08T14:30:05	37.78	101.18	4.5	4.0	10
8	2022-01-09T13:50:49	37.77	101.25	4.0	3.4	10
9	2022-01-12T18:20:41	37.73	101.55	5.7	5.2	8
10	2022-01-12T20:16:18	37.78	101.47	5.0	4.8	8
11	2022-01-12T21:01:53	37.73	101.57	4.8	4.5	9
12	2022-01-13T00:18:00	37.77	101.50	4.5	4.0	11
13	2022-01-27T03:15:26	37.78	101.25	4.3	3.8	11
14	2022-02-03T02:26:30	37.75	101.48	4.1	3.7	10

为分析门源  $M_S$ 6.9 地震空间分布特征,将目录中的单台定位结果除去,而在计算  $b$  值、 $h$  值等参数时,为尽可能增加数据,提高计算结果的可靠性,使用包含单台定位结果的全部序列数据。在空间上,门源  $M_S$ 6.9 地震余震集中区呈近 EW 向展布,长轴约 48km,短轴约 18km,最大余震(  $M_S$ 5.2 )则位于主震东侧,距主震约 22km,1 月 8 日 5.1 级余震则位于主震西侧约 8km 处(图 3(a))。

利用 ZMAP 软件中最小完整性震级  $M_c$  的计算方法(Wyss et al,1999;Wiemer et al,2000;Mignan et al,2020),计算得到门源  $M_S$ 6.9 地震序列的最小完整性震级  $M_c$  为  $M_L$  2.1(图 3(c))。基于所得最小完整性震级,利用最大似然法(Marzocchi et al,2003),对门源 6.9 级地震序列震级-频度曲线进行G-R关系拟合,得到序列  $a$  值和  $b$  值分别为  $4.05 \pm 0.12$  和  $0.74 \pm 0.04$ ,进而推测序列最大余震震级为  $M_L$  5.5,与实际发生的最大余震震级  $M_L$  5.7 相差 0.2(图 3(c))。

门源  $M_S$ 6.9 地震序列中主震与最大余震(  $M_S$ 5.2 )的震级差为 1.7,主震释放能量占序列释放总能量的 99.45%,表明该序列主震释放了此次地震序列的绝大部分能量。截至 2 月 7 日,门源 6.9 级地震序列的  $h$  值计算结果为 1.586(图 3(d)),表明该地震序列后续发生更大地震的可能性较小(蒋海昆等,2007)。结合上述分析,2022 年门源  $M_S$ 6.9 地震序列为主震-余震型地震序列。

2022 年门源  $M_S$ 6.9 地震序列余震活动水平较高,共记录到 2 次 5 级以上余震,分别是 1 月 8 日  $M_S$ 5.1 和 1 月 12 日  $M_S$ 5.2 地震,2 次强余震的震源机制解均显示地震为走滑型破裂,与主震的震源机制解一致(表 2,图 3(a))。2016 年门源  $M_S$ 6.4 地震序列余震水平则相对偏低,最大余震为 1 月 21 日 1 时 18 分  $M_S$ 3.4 地震(表 3)。

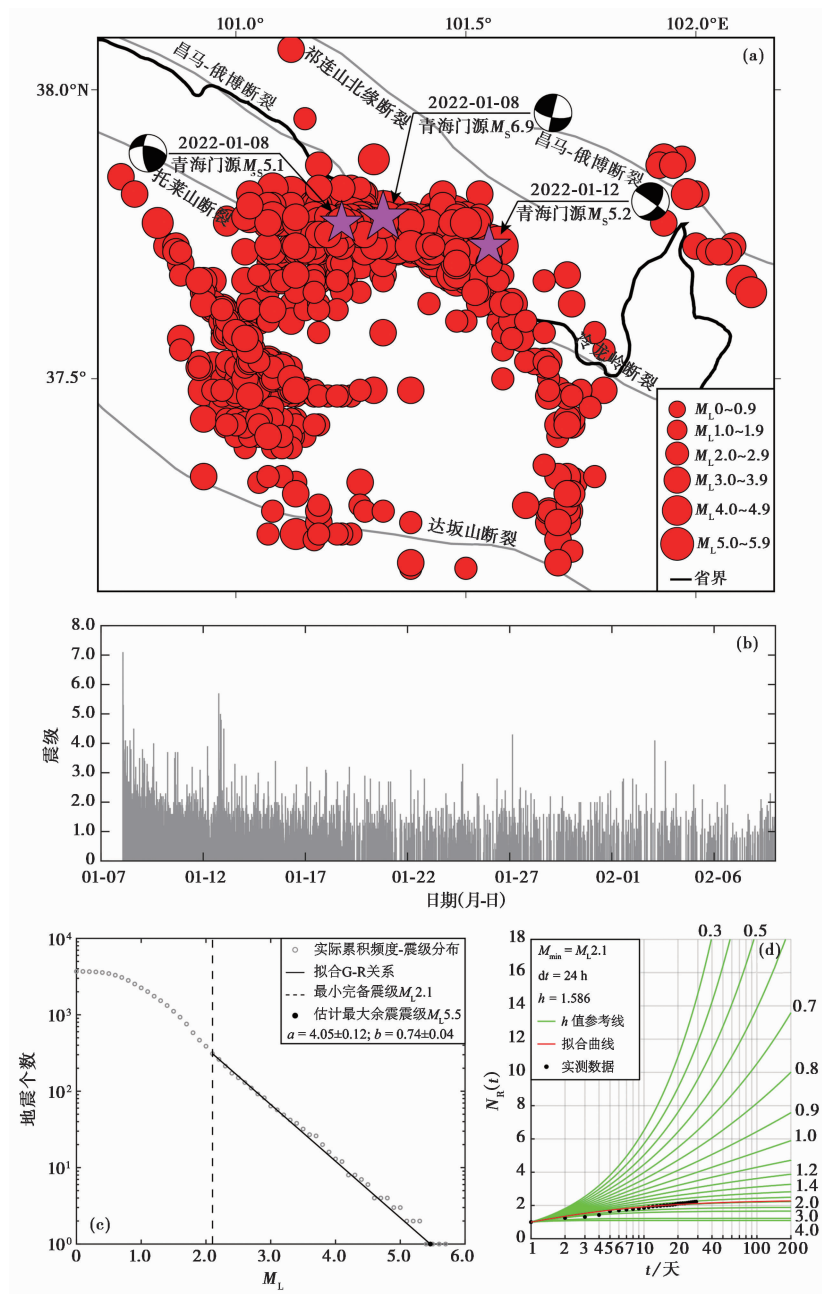


图 3 (a) 2022 年门源  $M_s$ 6.9 地震余震震中分布；(b) 地震序列  $M-t$  图；  
(c) 余震 G-R 关系图；(d) 余震衰减关系  $h$  值示意图(截至 2022 年 2 月 7 日)

2016 年 1 月 21 日至 2 月 20 日, 门源  $M_s$ 6.4 地震余震区共记录到  $M_L \geq 1.0$  余震 704 次, 其中  $M_L$  1.0~1.9 地震 574 次,  $M_L$  2.0~2.9 地震 113 次,  $M_L$  3.0~3.9 地震 16 次,  $M_L$  4.0~4.9 地震 1 次, 最大余震为 1 月 21 日 1 时 18 分门源  $M_L$  4.1 ( $M_s$ 3.4) 地震(表 3)。

2016 年门源  $M_s$ 6.4 地震序列未记录到 5 级以上余震, 地震序列中主震与最大余震的震级

表 3 2016 年  $M_s$  门源 6.4 地震序列目录 ( $M_L \geq 3.0$ )

编号	发震时刻 (年-月-日 T 时:分:秒)	震中位置		震级		震源深度 /km
		北纬/(°)	东经/(°)	$M_L$	$M_s$	
1	2016-01-21T01:13:12	37.65	101.62	6.4	6.4	10
2	2016-01-21T01:18:24	37.67	101.62	4.1	3.4	10
3	2016-01-21T01:19:42	37.63	101.63	3.3		11
4	2016-01-21T01:20:12	37.62	101.67	3.0		11
5	2016-01-21T01:22:08	37.68	101.57	3.1		10
6	2016-01-21T01:24:11	37.65	101.62	3.3		10
7	2016-01-21T01:24:52	37.63	101.67	3.0		10
8	2016-01-21T01:52:35	37.65	101.57	3.0		8
9	2016-01-21T01:57:20	37.67	101.63	3.3		10
10	2016-01-21T02:14:38	37.65	101.57	3.3		10
11	2016-01-21T03:25:06	37.68	101.60	3.3		10
12	2016-01-21T04:47:52	37.67	101.58	3.1		11
13	2016-01-21T17:55:26	37.65	101.65	3.4		8
14	2016-01-22T08:40:49	37.62	101.62	3.4		10
15	2016-01-23T16:02:50	37.68	101.60	3.6		6
16	2016-01-23T23:25:25	37.65	101.65	3.2		7
17	2016-02-02T02:27:30	37.67	101.57	3.0		10
18	2016-02-02T18:25:33	37.63	101.67	3.3		10

差为 2.0, 主震释放能量占序列的 99.98%。空间上, 余震呈 NW-SE 向展布, 长轴约 37km, 短轴约 18km。门源  $M_s$ 6.4 地震序列的  $M_L \geq 1.0$  余震主要集中在主震震中 10km 范围内, 共有  $M_L \geq 1.0$  余震 693 个, 占比约 98.4%。最大余震 ( $M_s$ 3.4) 则位于主震北侧约 2km 处(图 4(a))。

利用前文所述最小完整性震级  $M_c$  的计算方法, 截至 2016 年 2 月 20 日, 计算得到门源  $M_s$ 6.4 地震序列的  $M_c$  为  $M_L$ 1.3, 进一步利用最大似然法对该序列震级-频度曲线进行 G-R 关系拟合, 得到序列  $a$  值和  $b$  值分别为  $3.67 \pm 0.09$  和  $0.80 \pm 0.03$  (图 4(c)), 进而推测序列最大余震震级为  $M_L$ 4.6, 与实际发生的最大余震震级  $M_L$ 4.1 相差 0.5, 门源  $M_s$ 6.4 地震序列的  $h$  值计算结果为 2.239, 显著大于 1 (图 4(d))。

对比两次门源地震序列  $b$  值随时间的演化特征, 整体上门源  $M_s$ 6.4 地震序列  $b$  值曲线随时间变化更为平缓, 门源  $M_s$ 6.9 地震序列  $b$  值曲线起伏变化更为剧烈。2016 年  $M_s$ 6.4 地震序列  $b$  值曲线在主震发生后 1 天内存在快速起伏变化, 随后  $b$  值持续低于区域背景  $b$  值 ( $0.94 \pm 0.05$ ), 并且 2016 年 1 月 25 日至 1 月 28 日  $b$  值曲线呈明显上升趋势, 后续  $b$  值曲线超过背景  $b$  值达到最大值后, 开始缓慢下降后又再次上升(图 5(a)); 2022 年  $M_s$ 6.9 地震序列  $b$  值曲线则在主震发生后至最大余震发生前, 以近 24h 为周期起伏波动, 且最大余震发生前  $b$  值明显低于背景  $b$  值(图 5(b))。

### 3 讨论和结论

2016 年门源  $M_s$ 6.4 地震发生后, 中国地震局地质研究所提供的第一版区域地震构造图

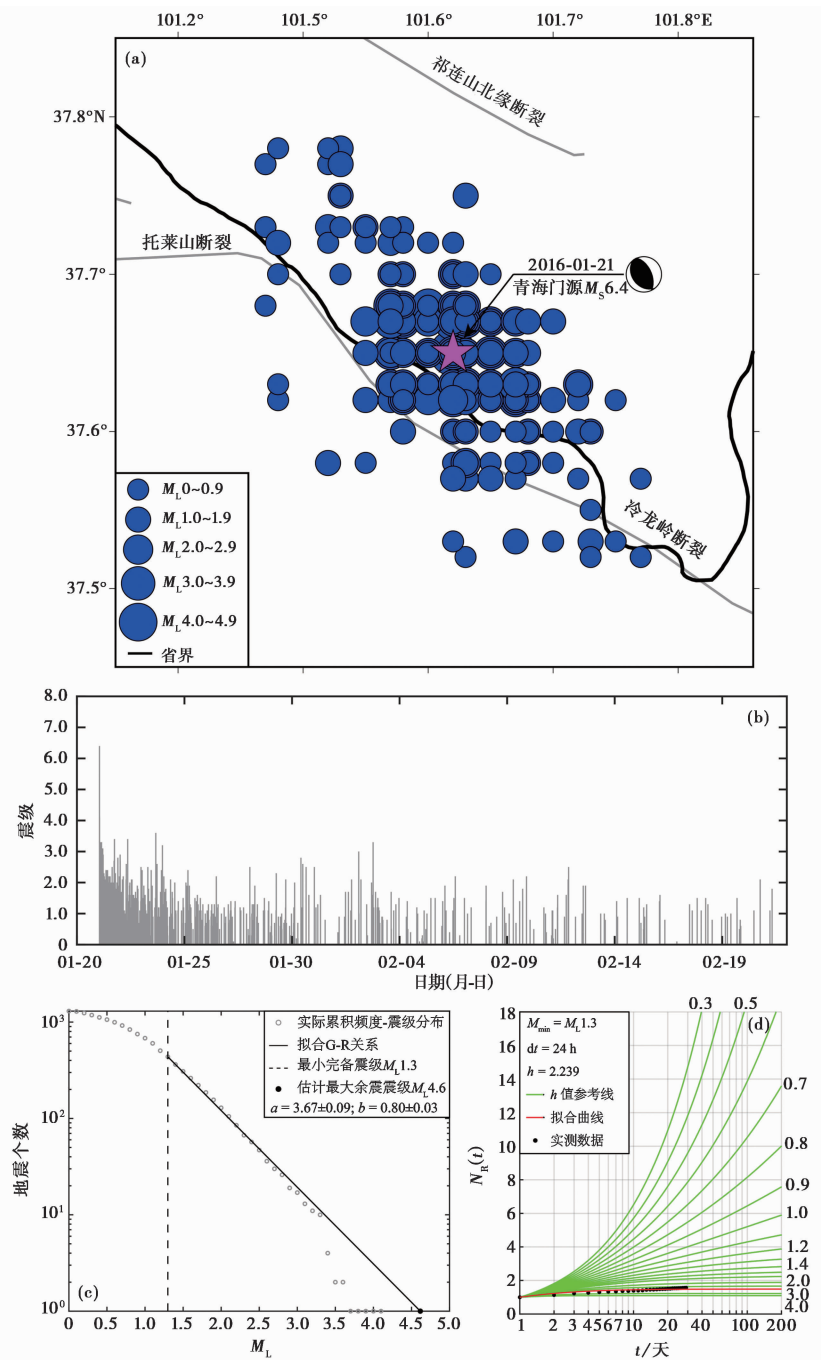


图 4 (a) 2016 年门源  $M_s6.4$  地震余震震中分布; (b) 地震序列  $M-t$  图; (c) 余震 G-R 关系图; (d) 余震衰减关系  $h$  值示意图 (截至 2016 年 2 月 20 日)

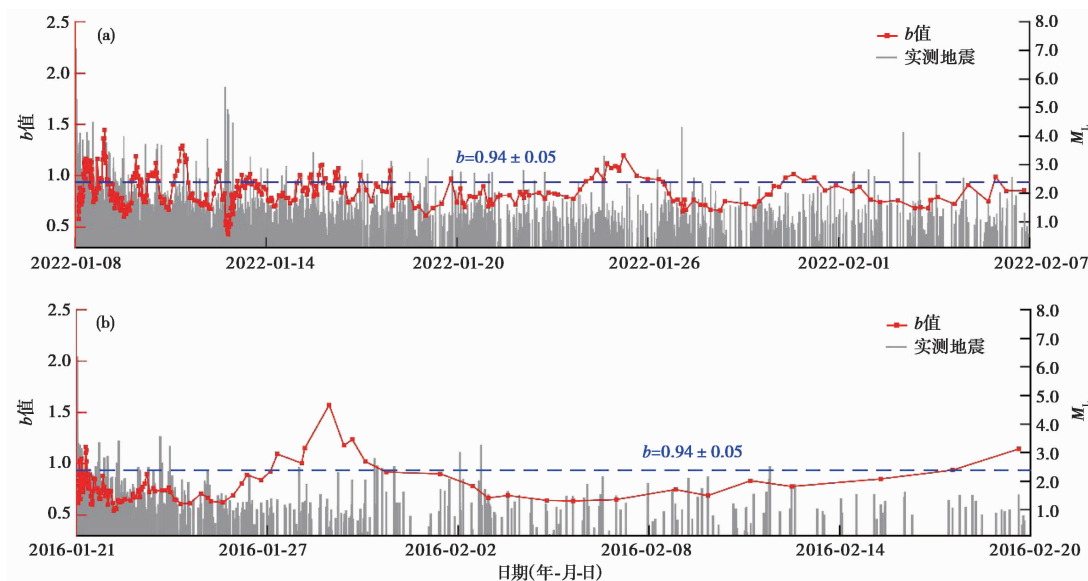


图5 2022年门源  $M_s 6.9$  (a)和2016年门源  $M_s 6.4$  地震(b)序列  $b$ 值随时间变化对比

中指出,门源  $M_s 6.4$  地震震中位于冷龙岭断裂附近,该断裂是全新世的左旋走滑兼逆冲性质的断裂,断裂走向近WN向<sup>④</sup>。2022年门源  $M_s 6.9$  地震发生后,中国地震震害防御中心提供的地震构造图显示,门源  $M_s 6.9$  地震震中位于冷龙岭断裂西端与托莱山北缘断裂交接部位,2个断裂均为全新世活动断裂,具有左旋逆走滑性质<sup>⑤</sup>。

结合2022年门源  $M_s 6.9$  地震和2016年  $M_s 6.4$  门源地震的余震分布和序列附近构造信息(图1),采用邓起东(2007)给出的1:400万中国活动构造图,可以发现2次地震主震震中均位于冷龙岭断裂附近,但由于冷龙岭断裂位处青藏高原东北缘北部祁连山地震带,附近区域构造复杂、强震频发,明确2次地震的发震构造仍是一个值得深入研究的问题。

关于2016年门源地震的发震构造,胡朝忠等(2016)结合高分辨率遥感解译和野外考察分析认为,冷龙岭断裂为该地震的控震构造,但发震构造为其北侧发育的一条走向约为 $140^\circ$ 的活动断裂;姜文亮等(2017)根据同震形变场、余震精定位及GPS等资料的研究结果,认为2016年门源地震发生在冷龙岭断裂西段北侧的分支断层上,该地震的发生造成分支断层两侧发生背斜式褶曲隆升。

强震发生后,如何快速、准确判定其发震构造对震后开展序列分析及区域地震危险性研究具有重要的意义。依据现有资料初步判定两次门源地震的附近断裂或者可能的发震构造均为冷龙岭断裂,结合震源机制解反演的结果,2016年门源地震的主震震源机制为典型的逆冲破裂,与冷龙岭断裂左旋走滑的主要运动性质不符,郑绪君等(2018)反演给出的破裂过程持续过程较短,且以单侧破裂为主,未破裂至地表(图2(b)),破裂区域位于震源东南侧冷龙岭断裂与民乐-大马营断裂之间,与地震现场震害调查和基于InSAR数据反演推断的结果一

④ <http://www.eq-igl.ac.cn/upload/images/2016/1/219011690.jpg>

⑤ [https://www.activefault-datacenter.cn/news\\_detail/265](https://www.activefault-datacenter.cn/news_detail/265)



致,即 2016 年门源  $M_s6.4$  地震的发震断层为冷龙岭断裂北侧的一条断裂(胡朝忠等,2016;姜文亮等,2017;赵强等,2017;Guo et al,2017;He et al,2020)。

2022 年门源  $M_s6.9$  地震发生后,中国地震局第一时间开展震后应急及现场科学考察工作,其中科考队地质组的工作由中国地震局地质研究所牵头,在震中附近区域开展了现场调研及无人机精细地貌测量和分析,初步认识如下:①该地震的区域构造较为复杂,位于冷龙岭断裂、托莱山断裂和肃南-祁连断裂的阶区部位(邓起东,2007;徐锡伟等,2016);②此次地震在地表产生了破裂带,北支和南支地表破裂带规模较大,整体展布约 25km;③发震构造为发育在冷龙岭断裂和托莱山断裂之间阶区的道沟断裂(韩竹军等,2022;万秀红等,2022)。

结合震源机制解和震源参数反演的结果,2 次门源地震  $M_s$  震级相差 0.5,  $M_w$  震级相差 0.7。门源  $M_s6.4$  地震逆冲型破裂性质和未出露至地表的特征表明,该地震发震断层破裂不充分,地震波辐射能主要消耗在断层垂向位移的过程中,后续余震活动次数少、震级低;余震释放的能量相对有限,无强余震发生。

两次门源地震序列所表现出的差异性,与地震破裂过程和区域构造环境均密切相关,冷龙岭断裂与托莱山断裂两大断裂相互交汇的复杂构造环境,导致了该区域既存在发生左旋走滑型强震的可能,同时具备孕育逆冲型强震的构造条件。当地震震源机制、破裂过程与区域主要构造特征较为一致时,发震断层往往经历更为充分的破裂,在该过程中消耗的能量也相对较少,剩余较多的地震波辐射能则通常伴随较为活跃的余震;当地震震源机制和破裂过程与区域构造特征差异较大时,断层破裂受到构造环境限制,在破裂过程中消耗的能量较大,可能导致后续余震活动水平普遍偏弱。

分析 2 次地震的破裂过程,门源  $M_s6.4$  地震为单侧破裂,图 4(a) 中余震定位结果未经过重定位等处理,余震空间上分布于主震两侧,可能是由于逆冲型地震余震空间展布较为集中且地震定位存在误差所致。门源  $M_s6.9$  地震则以主震为中心,向西侧沿托莱山断裂破裂发生了一次  $M_s5.1$  余震,随后向东侧沿冷龙岭断裂破裂发生了  $M_s5.2$  最大余震,呈现出典型的双侧破裂特征,东侧余震密集区与 2016 年门源地震余震区相接。从应力触发的角度来看,2 次地震存在一定的关联,静态库仑应力计算结果显示,2022 年门源  $M_s6.9$  地震位于 2016 年门源  $M_s6.4$  地震的库仑应力正影响区,其对 2022 年门源  $M_s6.9$  地震的发生具有一定的促进作用(李振洪等,2022;刘博瀚,2021)。

进一步综合对比 2022 年和 2016 年门源地震的余震演化特征,可以发现,尽管震级存在一定差异,在同一构造区域发生的这两次强震,主发震断层破裂过程及震源特征是导致余震衰减特征显著不同的主要因素,由于目前两个余震区已经相接,表明两次地震现有的破裂交汇区可能不再具备发生强震的构造空间。

考虑冷龙岭断裂和托莱山断裂交汇区域历史地震丰富,尽管 2016 年门源  $M_s6.4$  地震的余震区与 1986 年门源  $M_s6.5$  地震的余震区重叠程度更高,可能是受到该区域构造复杂,如断裂交汇、多发育隐伏断裂等特征影响(He et al,2020),因此,该区域未来仍然具备发生左旋走滑或逆冲型强震的构造条件。

致谢:中国地震台网中心国家地震科学数据中心(<http://data.earthquake.cn>)提供数据支撑,审稿专家为本文提出了宝贵修改建议,在此一并表示诚挚的感谢。

## 参考文献

- 邓起东, 2007. 中国活动构造图(1:400万). 北京:地震出版社.
- 韩立波, 2022. 2022年青海门源  $M_s$ 6.9地震震源机制解. 地震科学进展, **52**(2):49~54.
- 韩帅, 吴中海, 高扬, 等, (2022-03-13). 2022年1月8日青海门源  $M_s$ 6.9地震地表破裂考察的初步结果及对冷龙岭断裂活动行为和区域强震危险性的启示. 地质力学学报, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3672.p.20220311.0916.002.html>.
- 韩竹军, 牛鹏飞, 李科长, 等, (2022-01-18) [2022-03-30]. 2022年1月8日青海门源6.9级地震的一些初步认识, <https://www.eq-igl.ac.cn/zhxw/info/2022/36632.html>.
- 何文贵, 刘百篪, 袁道阳, 等, 2000. 冷龙岭活动断裂的滑动速率研究. 西北地震学报, **22**(1):90~97.
- 何文贵, 袁道阳, 葛伟鹏, 等, 2010. 祁连山活动断裂带中段冷龙岭断裂滑动速率的精确厘定. 地震, **30**(1):131~137.
- 侯康明, 邓起东, 刘百篪, 等, 1998. 1927年古浪8级大震破裂的三维数值理论模拟. 西北地震学报, **20**(3):59~65.
- 侯康明, 邓起东, 刘百篪, 1999. 对古浪8级大震孕育和发生的构造环境及发震模型的讨论. 中国地震, **15**(4):47~56.
- 胡朝忠, 杨攀新, 李智敏, 等, 2016. 2016年1月21日青海门源6.4级地震的发震机制探讨. 地球物理学报, **59**(5):1637~1646.
- 蒋海昆, 傅征祥, 刘杰, 等, 2007. 中国大陆地震序列研究. 北京:地震出版社.
- 姜文亮, 2018. 冷龙岭断裂带全新世破裂模式、大震复发特征研究及其区域构造意义. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所.
- 姜文亮, 李永生, 田云锋, 等, 2017. 冷龙岭地区2016年青海门源6.4级地震发震构造特征. 地震地质, **39**(3):536~549.
- 鞠慧超, 2020. 祁连山地区地壳三维速度结构研究. 硕士学位论文. 兰州:中国地震局兰州地震研究所.
- 李振洪, 韩炳权, 刘振江, 等, (2022-01-13). InSAR数据约束下的2016年和2022年青海门源地震震源参数及其滑动分布. 武汉大学学报(信息科学版), <https://doi.org/10.13203/j.whugis20220037>.
- 李智敏, 盖海龙, 李鑫, 等, 2022. 2022年青海门源  $M_s$ 6.9地震发震构造和地表破裂初步调查. 地质学报, **96**(1):330~335.
- 刘博瀚, 2021. 基于InSAR技术的2016年门源  $M_w$ 5.9地震同震-震后形变与震源参数反演研究. 硕士学位论文. 西安:长安大学.
- 潘家伟, 李海兵, Chevalier M L, 等, 2022. 2022年青海门源  $M_s$ 6.9地震地表破裂带及发震构造研究. 地质学报, **96**(1):215~231.
- 万秀红, 屠泓为, 2022. 2022年1月8日青海门源  $M_s$ 6.9地震同震形变场及地下位错反演. 中国地震, **38**(1):21~29.
- 徐锡伟, 韩竹军, 杨晓平, 等, 2016. 中国及邻近地区地震构造图. 北京:地震出版社.
- 张会平, 张培震, 郑德文, 等, 2012. 祁连山构造地貌特征:青藏高原东北缘晚新生代构造变形和地貌演化过程的启示. 第四纪研究, **32**(5):907~920.
- 赵强, 王双绪, 蒋锋云, 等, 2017. 利用InSAR技术研究2016年青海门源  $M_w$ 5.9地震同震形变场及断层滑动分布. 地震, **37**(2):95~105.
- 郑文俊, 张培震, 彭道阳, 等, 2009. GPS观测及断裂晚第四纪滑动速率所反映的青藏高原北部变形. 地球物理学报, **52**(10):2491~2508.
- 郑绪君, 张勇, 马强, 等, 2018. 基于强震动资料的破裂过程快速反演及其自动化的可行性. 地球物理学报, **61**(10):4021~4036.
- 支明, 孙丽, 杨志高, 等, 2022. 2022年1月8日青海门源6.9级地震的快速测定与数据产品产出. 中国地震, **38**(1):30~41.
- Guo P, Han Z J, An Y F, et al, 2017. Activity of the Lenglongling fault system and seismotectonics of the 2016  $M_s$ 6.4 Menyuan earthquake. *Sci China*, **60**(5):929~942.
- Guo P, Han Z J, Dong S P, et al, 2019a. Surface rupture and slip distribution along the Lenglongling fault in the NE Tibetan Plateau: implications for faulting behavior. *J Asian Earth Sci*, **172**:190~207.
- Guo P, Han Z J, Mao Z B, et al, 2019b. Paleoearthquakes and rupture behavior of the Lenglongling fault: implications for seismic hazards of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res*, **124**(2):1520~1543.
- Guo P, Han Z J, Gao F, et al, 2020. A new tectonic model for the 1927  $M$ 8.0 Gulang earthquake on the NE Tibetan Plateau. *Tectonics*, **39**(9):e2020TC006064.

- He X H, Zhang Y P, Shen X Z, et al, 2020. Examination of the repeatability of two  $M_s6.4$  Menyuan earthquakes in Qilian-Haiyuan fault zone(NE Tibetan Plateau) based on source parameters. *Phys Earth Planet Inter*, **299**: 106408.
- Marzocchi W, Sandri L, 2003. A review and new insights on the estimation of the  $b$ -value and its uncertainty. *Ann Geophys*, **46**(6): 1271~1282.
- Mignan A, Woessner J, (2020-08-21) [2022-03-30]. Estimating the magnitude of completeness for earthquake catalogs. Swiss Seismological Service; ETH Zurich. [http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Mignan-Woessner-2012-CORSSA-Magnitude-of-completeness.pdf\\_2063069299.pdf](http://www.corssa.org/export/sites/corssa/.galleries/articles-pdf/Mignan-Woessner-2012-CORSSA-Magnitude-of-completeness.pdf_2063069299.pdf).
- Wiemer S, Wyss M, 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs; examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull Seismol Soc Am*, **90**(4): 859~869.
- Wyss M, Hasegawa A, Wiemer S, et al, 1999. Quantitative mapping of precursory seismic quiescence before the 1989,  $M7.1$  off-Sanriku earthquake, Japan. *Ann Geofis*, **42**(5): 851~869.

## Comparison of Aftershock Sequences between the 2022 Menyuan $M_s6.9$ Earthquake and the 2016 Menyuan $M_s6.4$ Earthquake in the Lenglongling Fault Zone

Meng Lingyuan Xie Mengyu Zang Yang

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

**Abstract** An  $M_s6.9$  earthquake occurred near Menyuan County, Qinghai Province, China on January 8, 2022. The epicenter of Menyuan  $M_s6.9$  earthquake is about 33km only away from another  $M_s6.4$  earthquake near Menyuan on January 21, 2016. These two events both occurred near the Lenglongling fault zone, and the aftershocks of these two sequences were closely distributed. The focal mechanism of the 2022 Menyuan  $M_s6.9$  earthquake is strike-slip with a moment magnitude of  $M_w6.6$ , while the focal mechanism of the 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake is thrust with a moment magnitude of  $M_w5.9$ . It is of great significance to compare the characteristics of these two earthquake sequences to have a better understanding of the aftershock attenuation and other characteristics of sequences occurred near the Lenglongling fault zone and its adjacent areas. After comparing the temporal and spatial evolutionary characteristics of the aftershocks of these two Menyuan earthquakes, it can be concluded that there are some differences between the source mechanism and rupture scale of these two events. As to the former one, the rupture of the seismogenic fault is much more sufficient. As a result, the energy released by this event is stronger and the seismicity of its aftershock is much more active. While to the latter one, the seismogenic fault failed to rupture to the surface, and the seismicity of its aftershocks is less intense. We also find that the differences between 2022 Menyuan  $M_s6.9$  earthquake and 2016 Menyuan  $M_s6.4$  earthquake sequences are considered to be closely related to the rupture process of the seismogenic fault and also affected by the regional tectonic environment.

**Keywords:** The Menyuan  $M_s6.9$  earthquake; The Menyuan  $M_s6.4$  earthquake; Lenglongling fault zone; Earthquake sequence