

# 1900年以来祁连山地震带7级以上地震衰减特征

任雪梅, 李文君

宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川

收稿日期: 2023年7月12日; 录用日期: 2023年8月18日; 发布日期: 2023年8月30日

## 摘要

文章通过对1900年以来祁连山地震带7级以上强震发生后震中区范围内5级以上地震的发生情况进行分析, 发现该区域7级以上强震发生后1~6年震中100~220 km范围内5级地震活动明显增强, 表现为增震效应; 7级以上强震发生的23~56年震中100~220 km范围内5级地震活动减弱, 表现为减震效应。由于发震构造的不同, 1920年海原的8 1/2级地震和1927年古浪8级地震的余震活动特征存在较大差异。

## 关键词

祁连山地震带, 衰减特征, 增震, 减震, 发震构造

## Attenuation Characteristics of Earthquakes with $M \geq 7.0$ in Qilian Mountain Seismic Zone Since 1900

Xuemei Ren, Wenjun Li

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan Ningxia

Received: Jul. 12<sup>th</sup>, 2023; accepted: Aug. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Aug. 30<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, the occurrence of earthquakes with  $M \geq 5.0$  in the central area after strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  in the Qilian Mountain seismic zone since 1900 is analyzed. It is found that earthquakes with  $M \geq 5.0$  within 100~220 km of the epicenter are obviously enhanced 1~6 years after earthquakes with  $M \geq 7.0$  in this region, which shows the seismicity enhancement effect. The seismicity of earthquakes with  $M \geq 5.0$  after 23~56 years strong earthquakes with  $M \geq 7.0$  de-

creases within 100~220 km of the epicenter, which shows the damping effect. Due to the different seismogenic structures, the characteristics of aftershock activity of Haiyuan M8 1/2 earthquake in 1920 and Gulang M8 earthquake in 1927 are quite different.

## Keywords

Qilian Mountain Seismic Zone, Attenuation Characteristics, Increase Earthquakes, Damping Earthquakes, Seismogenic Structure

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

强震的发生对周围地震的影响有增震作用, 也有减震作用。研究大震增震作用的代表学者先后有: Mogi (1981) [1]、张国民等(1984) [2]、霍茨(1995) [3]、陈绍绪(1996) [4]、傅征祥等(2001) [5]。研究大震减震作用的代表学者先后有: Maji 等(1979) [6]、郭增建等(1984) [7]、黄福明等(1992) [8]、Cornell 等(1993) [9]、鄢家全等(1994) [10]。国内大震增震作用的震例——1920年海原 8 1/2 大震可能使古浪大地震提前 16~44 年发生[5]; 玛尼 7.6 级地震造成昆仑 8.1 级地震断层面上库仑应力的增加, 使得昆仑地震的发生提前了最长达 10 年的时间, 说明 1997 年玛尼地震对 2001 年昆仑山口西 8.1 级特大地震起到促进作用, 即起到增震作用[11]。国内大震减震的震例也有许多, 如 1556 年陕西华县 8.0 级大震后渭河盆地至今无 6 级以上地震发生; 1668 年山东郯城发生 8 1/2 级大震, 除短时间的余震外, 山东半岛再未发生过 6.0 级以上地震。

张国民等(1997) [12]分析了成组活动强震间相互影响的方式, 结果表明, 由于孕震大系统中的每一次地震活动都可能对其造成应力调整的影响, 从而使震源区应力随时间的变化变得十分复杂。例如一个大震孕育区, 一个震源体的破裂, 必然会引起另一个震源体应力的增加, 加速地震的孕育、发生。从短期看, 1950 年西藏墨脱地震可能对 1951 年西藏当雄地震具有促进和触发作用, 即起到增震作用; 但从长远看, 察隅和当雄地震后, 青藏块体的东南端, 几十年来再无特大地震发生, 可能这两次地震对青藏块体东南端起到减震作用[13]。

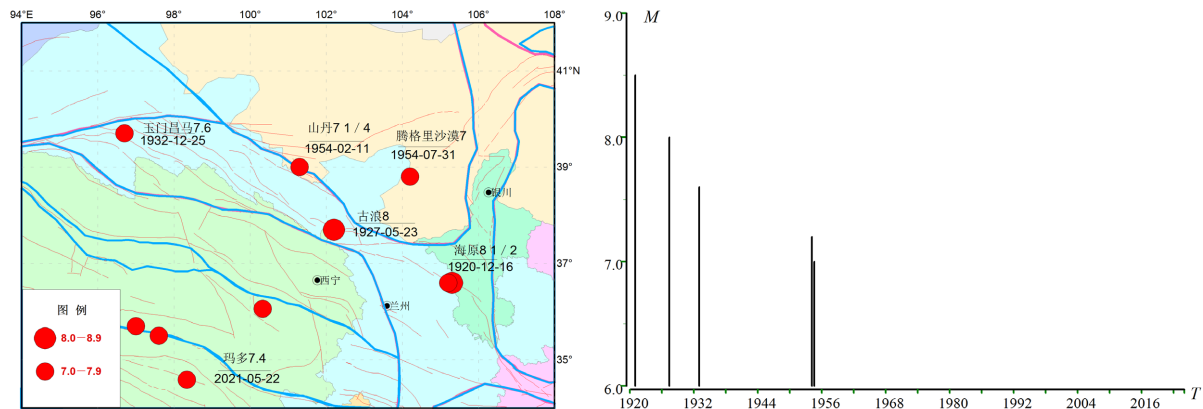
祁连地震带 1920 年至 1932 年间发生了 3 次 7 3/4 级以上强震, 该区域 7 级以上地震已经平静 91 年, 在古浪 8 级地震原震区 1986 年以来, 青海门源接连发生了 1986 年年 8 月 26 日 6.5 级地震、2016 年 1 月 21 日 6.4 级地震和 2022 年 1 月 8 日 6.9 级地震, 其它 2 个强震后原震区没有发生 6 级以上地震, 本文拟分析造成这种差异的原因和该区域 5 级以上地震活动的特征, 该结果将对该区域未来 5 级以上地震的发生和 7 级以上地震发生后 5 级地震的衰减特征提供参考。

本文使用中国地震台网中心提供的《中国强震目录》(1900-01-01~2022-02-28)和《中国弱震目录》(1970-01-01~2022-02-28), 拟研究 1900 年以来祁连山地震带 7 级以上强震发生后震中区范围内 5 级以上地震的发生情况。

## 2. 1900 年以来祁连山地震带 7 级以上地震特征

图 1(左)为 1900 年以来祁连山断裂带 7 级以上地震分布图。可以看出, 其中 4 次强震基本贯通了整个祁连山断裂带。傅征祥等(2001) [5]依据弹性半空间地震位错理论, 研究青藏高原北缘海原、古浪、昌

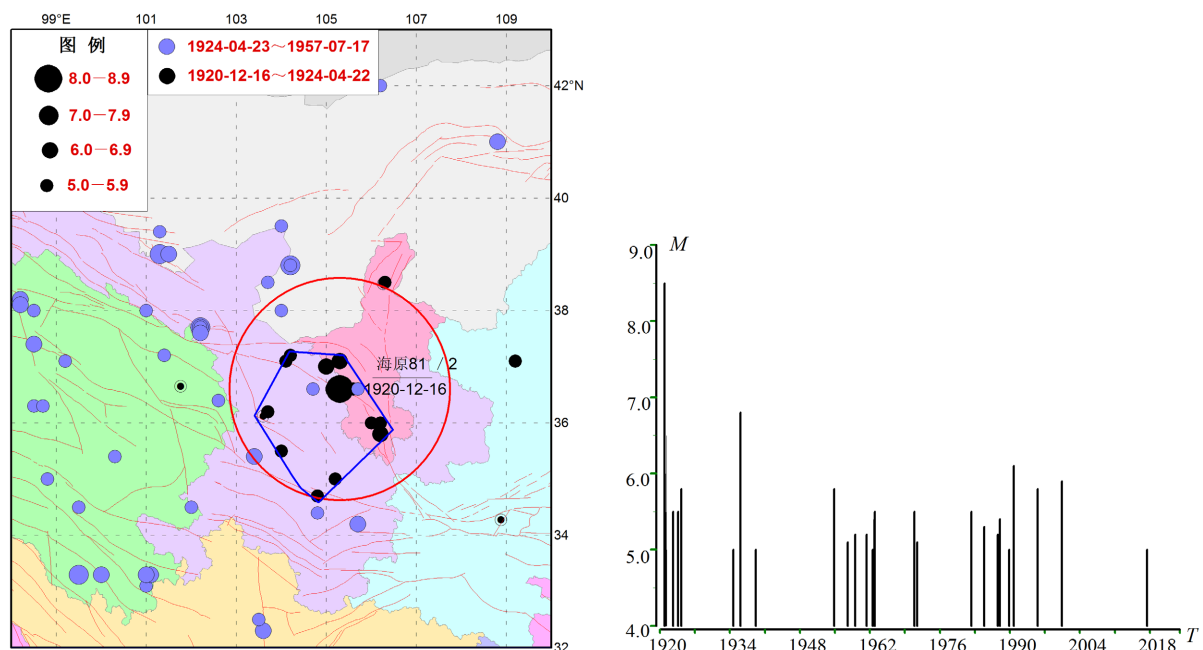
马大地震间相互作用的动力学特征。结果表明, 海原大地震可能使古浪大地震提前 16~44 年发生。这进一步说明宁夏海原 8 1/2 级地震对甘肃古浪 8 级地震起到增震作用, 甘肃古浪 8 级地震对 1932 年甘肃昌马 7.6 级地震也起到了一定的增震作用, 受这 3 个强震的发生, 1954 年又发生了甘肃山丹 7.2 级和内蒙古腾格里沙漠 7 级地震。这些强震的发生对祁连山地震带及其附近区域的 5 级以上地震活动产生重要的影响。从图 1(右)图可以看出, 祁连山断裂带 7 级以上地震自 1954 年后至今已经平静了 65 年。



**Figure 1.** Distribution of earthquakes with  $M \geq 7$  on Qilian Mountain Fault Zone since 1900 (left) and M-T diagram (right)  
**图 1.** 1900 年以来祁连山断裂带 7 级以上地震分布图(左)和 M-t 图(右)

### 3. 1900 年以来祁连山地震带 7 级以上地震衰减特征

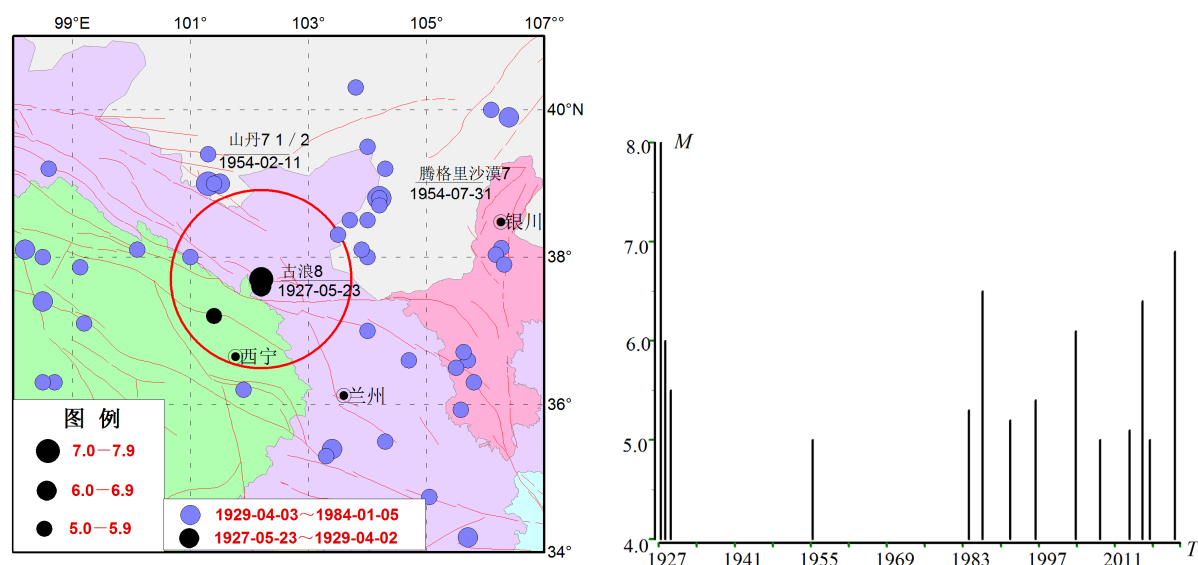
1900 年以来祁连山地震带及其附近共发生 7 级以上地震 5 次(不计余震), 下面分析这 5 次 7 级以上地震的衰减特征。



**Figure 2.** Seismic distribution and M-T diagram of earthquakes with  $m \geq 5$  within 220 km from the epicenter after Haiyuan earthquake with  $m \geq 8.1/2$  in 1920  
**图 2.** 1920 年海原 8 1/2 级地震后地震分布和震中 220 km 范围内 5 级以上地震 M-t 图

1920年海原8 1/2级地震发生后3年多震中区域及邻近地区5级以上地震主要集中在距离主震220 km的范围内(图2左图内的不规则蓝色区域), 主要分布在海原断裂带及其西南区域, 在其东北的区域——宁夏吴忠-灵武地区零星分布; 1924年5月1日至1957年7月17日1920海原8 1/2级地震主震220 km范围内仅发生5~6级地震2次, 6级以上地震1次, 余震区地震活动显著减弱(图2左图)。图2右图为1920年12月16日至今海原8 1/2级地震震中220 km范围内的5级以上地震M-t图。可以看出, 受1920年海原8 1/2级地震影响, 发震3年多该区域5级以上地震活动增强, 主震后23年期间该区域5级以上地震活动显著平静, 1934年4月23日至1957年7月18日23年期间仅发生2次5级以上地震, 6级以上地震1次。

1927年甘肃古浪8级地震发生后1年多震中区域及邻近地区5级以上地震主要集中在震中附近130 km的范围内(图3左图); 1929年4月3日后震中区130 km范围内出现了长达55年多的5级以上地震活动平静, 期间仅发生1次5级以上地震(图1~6)。该8级地震发生后仅1.86年5级以上地震活动增强, 其后55年出现平静, 该特征和1920年海原8 1/2级地震震后震中区5级以上地震活动特征相同, 但5级以上地震活动的减震效应更显著。

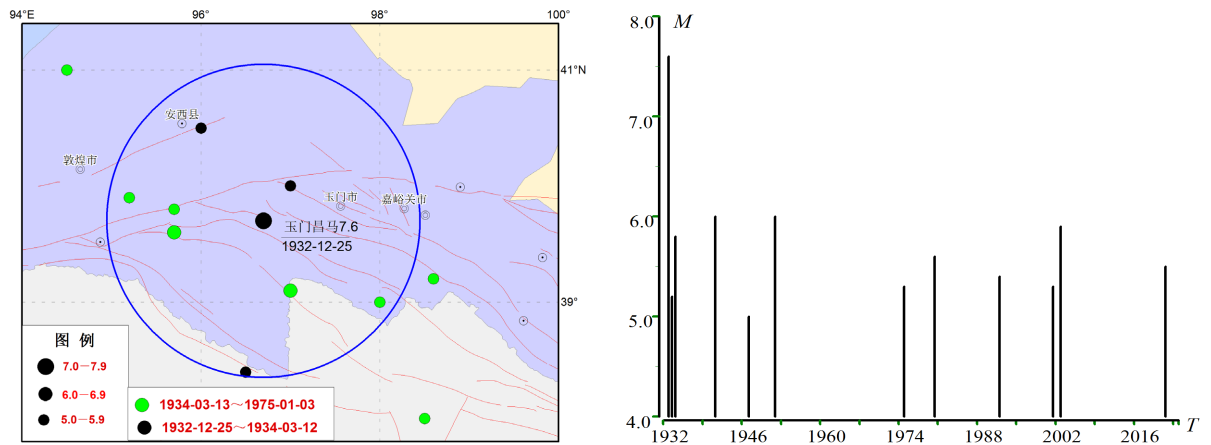


**Figure 3.** Seismic distribution and M-T diagram of earthquakes with  $m \geq 5$  within 130 km of the epicenter after the Gulang  $m \geq 8$  earthquake in Gansu Province in 1927

**图 3.** 1927年甘肃古浪8级地震后地震分布和震中130 km范围内5级以上地震M-t图

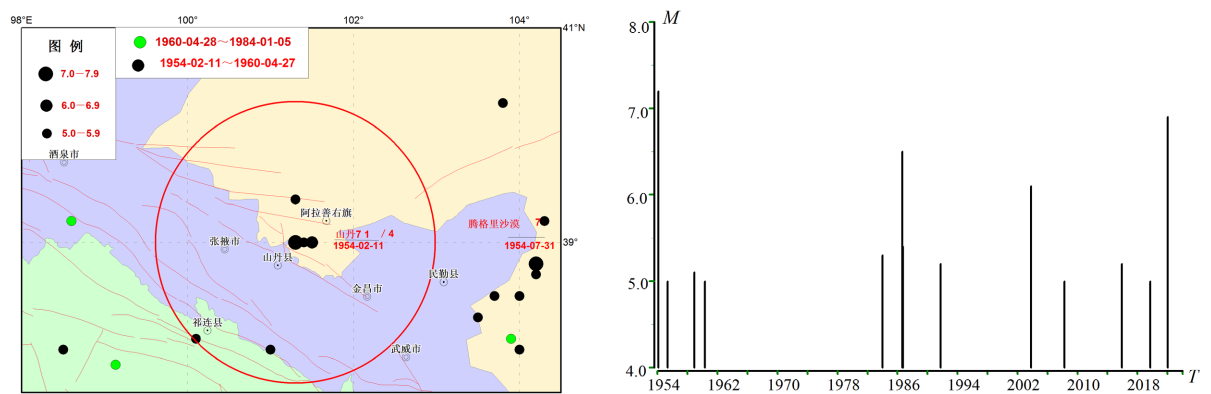
1932年甘肃玉门昌马7.6级地震发生后1年多震中区域及邻近地区5级以上地震主要集中在震中附近150 km的范围内(图4左图); 1934年3月12日后震中区150 km范围内出现了长达40年多的5级以上地震活动平静, 期间发生5次5级以上地震(图4)。该7.6级地震发生后仅1.21年5级以上地震活动增强, 其后40年出现较平静现象, 该特征和1927年甘肃古浪8级地震震后震中区5级以上地震活动特征相似。

1954年甘肃山丹7 1/4级地震发生后6年多震中区域及邻近地区5级以上地震主要集中在震中附近145 km的范围内(图5左图); 1960年4月27日后震中区145 km范围内出现了23年多的5级以上地震活动平静, 期间没有发生1次5级以上地震(图5)。该7 1/4级地震发生后6.21年5级以上地震活动增强, 其后23年出现平静, 该特征和1927年甘肃古浪8级地震震后震中区5级以上地震活动特征相似。



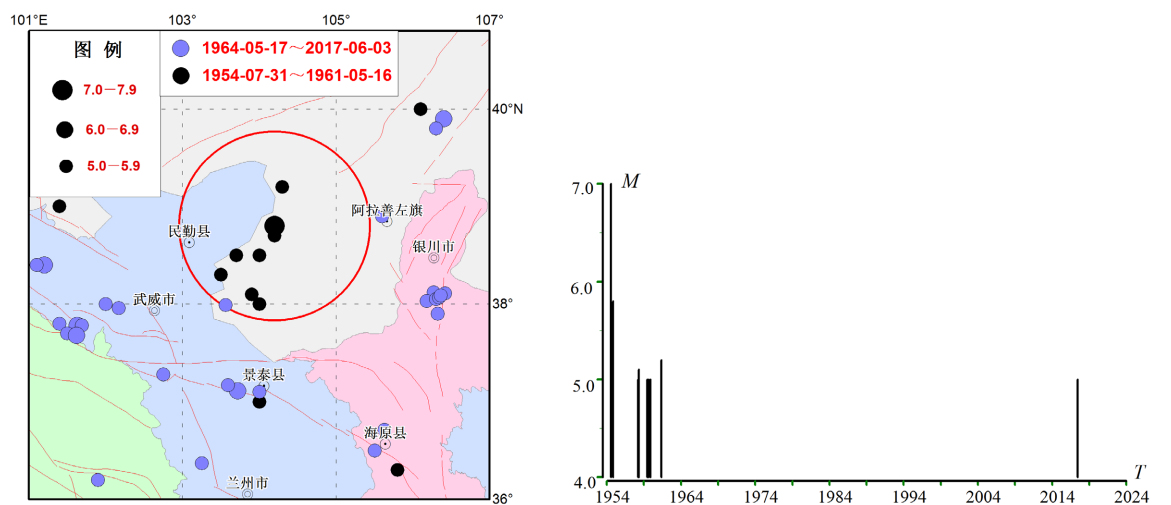
**Figure 4.** Earthquake distribution and M-T diagram of earthquakes with  $m \geq 5$  within 150 km of epicenter after Changma earthquake with  $m \geq 7.6$  in Yumen, Gansu in 1932

**图 4.** 1932 年甘肃玉门昌马 7.6 级地震后地震分布和震中 150 km 范围内 5 级以上地震 M-t 图



**Figure 5.** Seismic distribution and M-T diagram of earthquakes with  $m \geq 5$  within 145 km from the epicenter after the 1954 Shandan earthquake with  $m \geq 7.1/4$  in Gansu

**图 5.** 1954 年甘肃山丹 7 1/4 级地震后地震分布和震中 145 km 范围内 5 级以上地震 M-t 图



**Figure 6.** Earthquake distribution and M-T diagram of earthquakes with  $m \geq 5$  within 108 km of the epicenter after the  $m \geq 7$  earthquake in Tengger Desert, Gansu Province, on April 1954

**图 6.** 1954 年日甘肃腾格里沙漠 7 级地震后地震分布和震中 108 km 范围内 5 级以上地震 M-t 图

1954年甘肃腾格里沙漠7级地震震发生后6年多震中区域及邻近地区5级以上地震主要集中在震中附近108 km的范围内(图6左图); 1961年5月16日后震中区108 km范围内出现了长达56年多的5级以上地震活动平静, 期间没有发生1次5级以上地震(图6)。该7级地震发生后6.79年5级以上地震活动增强, 发生9次5级以上地震, 其后, 56年出现平静, 该特征和1927年甘肃古浪8级地震震后震中区5级以上地震活动特征相似, 但5级以上地震活动的减震效应更显著。

从以上分析来看, 这5次7级以上地震后25~62年间均存在以下特征:

第一, 强烈的增震效应。7级以上地震发生后1~6年震中区100~220 km范围内5级地震活动增强, 1920年海原8 1/2级地震和1927年甘肃古浪8级地震后的3.37年和1.86年间发生5~7级地震16次和10次; 3次7级以上地震后1~7年间发生5~7级地震3~9次, 显然前2个8级以上地震发生后震中区5级以上地震活动增强的程度高。

第二, 减震效应。这5个7级以上地震发生后23~56年震中区100~220 km范围内5级地震活动减弱, 1920年海原8 1/2级地震和1927年甘肃古浪8级地震后在震中区5~7级地震活动增强3.37年和1.86年后, 分别出现了23和55年多的长时间平静, 期间仅分别发生5~7级地震3次和1次; 后3次7级以上地震减震效应更显著, 除了1932年甘肃昌马7.6级地震在震中区5~7级地震活动增强1.21年后的40年多长时间平静期发生5~7级地震5次, 其它两个7级以上地震在平静期23年和56年间没有发生1次5~7级地震, 显然后2个7级以上地震发生后震中区5级以上地震活动增强后的平静期减震效应更显著。

第三, 根据巴特余震震级定律[14]。祁连山地震带这5个地震后最大余震一般比主震级小1.2, 仅有1920年海原8 1/2级地震、1927年甘肃古浪8级地震、1932年甘肃玉门昌马7.6级地震和1954年甘肃山丹7 1/4的最大余震为6级。实际的余震统计结果也是支持该定律: 表1可以看出, 在主震发生后余震活动显著的1~7年内(增震时段)1920年海原8 1/2级地震和1927年甘肃古浪8级地震分别发生6级余震3个和2个, 1954年山丹7 1/4级地震仅发生6级余震1次; 其它两个7级地震后没有发生6级余震。在主震发生后余震活动明显减弱的23~56年内(减震时段)1920年海原8 1/2级地震和1954年甘肃山丹7 1/4级地震分别发生1次和2次6级地震, 其它7级地震在减震时段没有发生6级地震。

**Table 1.** Attenuation parameters of earthquakes with  $m \geq 7$  in Qilian mountain seismic belt since 1900

**表 1.** 1900年以来祁连山地震带7级以上地震衰减参数表

序号	7级地震	空间(km)		时间	时间间隔 (年)	5~6级地震 数目	6~7级地震 数目
1	1920-12-16 海原 8 1/2	220	增震	1920-12-16~1924-04-22	3.37	13	3
			减震	1924-04-23~1957-07-17	23.24	2	1
2	1927-05-23 古浪 8	130	增震	1927-05-23~1929-04-02	1.86	8	2
			减震	1929-04-03~1984-01-05	55.76	1	0
3	1932-12-25 玉门昌马 7.6	150	增震	1932-12-25~1934-03-12	1.21	3	0
			减震	1934-03-13~1975-01-03	40.81	3	2
4	1954-02-11 山丹东北 7 1/4	145	增震	1954-02-11~1960-04-27	6.21	4	1
			减震	1960-04-28~1984-01-05	23.71	0	0
5	1954-07-31 腾格里沙漠北 7.0	108	增震	1954-07-31~1961-05-16	6.79	9	0
			减震	1961-05-17~2017-06-03	56.05	0	0



第四, 图 7 是 1984 年以来宁夏及邻区及甘东南 6 级以上地震分布图, 可以看出, 祁连山地震带的 4 个 7 级以上地震后和 1954 年甘肃腾格里沙漠 7 级地震的余震区内在余震活动衰减后 6 级以上活动平静, 而在祁连山地震带中段 6 级以上地震活动较活跃, 1927 年甘肃古浪 8 级地震和 1954 年甘肃山丹 7 1/4 级地震之间的 6 级以上地震较活跃。6 级地震活跃的时间为古浪 8 级地震震后减震时段后(1984 年 1 月), 同是 8 级地震, 为何 1920 年海原 8 1/2 级地震在减震时段后余震区域仅发生 1 次 6 级地震(1990 年 10 月 20 日甘肃景泰 6.2 级地震), 而 1927 年甘肃古浪 8 级地震发生 3 次 6 级地震, 而且这 3 次 6 级地震距离古浪 8 级地震震中 50~80km, 宁夏及邻区的 6 级以上活动自 1921 年 4 月 12 日固原 6 1/2 级地震后平静 100 年至今。

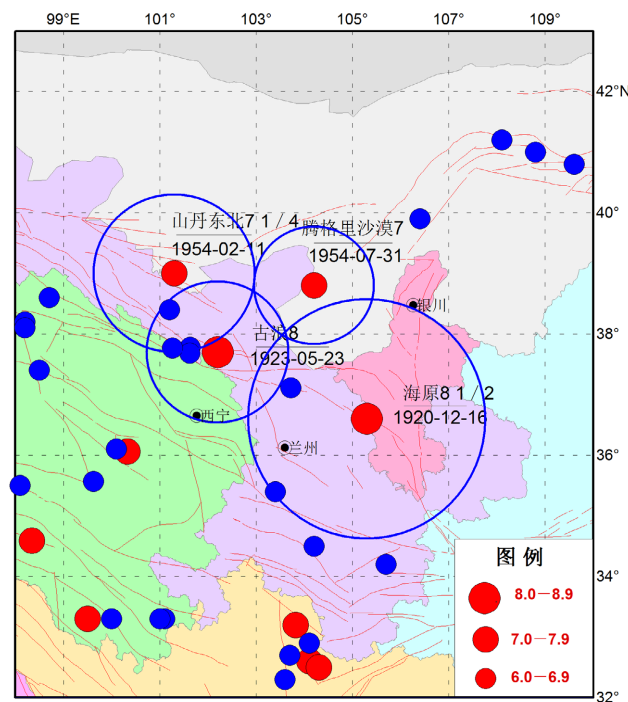


Figure 7. Distribution of earthquakes with  $m \geq 6$  in Ningxia and its adjacent areas since 1900 (aftershocks deleted)

图 7. 1900 年以来宁夏及邻区 6 级以上地震分布图(删除余震)

#### 4. 差异分析

海原断裂带是一条典型的左旋走滑形变带, 并具有逆断层性质。海原活动断裂带总体走向为北西  $50^\circ \sim 70^\circ$ , 西起甘肃景泰南, 向南东方向一直延伸到固原以西, 长达 237 公里, 断裂性质为逆左旋走滑断裂带。海原地震形变带的展布和海原活动断裂带完全吻合, 这充分说明海原活动断裂带是这次大地震的发震构造。1920 年海原的 8 1/2 级地震后 3.37 年内 5 级以上地震活动分布在整個断裂带上(图 2), 表明 1920 年海原的 8 1/2 级地震使整个断裂带上的能量得以释放。1927 年古浪 8 级地震并不是单一的某条断裂活动, 是由构成古浪推覆体的天桥沟 - 黄羊川断裂、皇城双塔断裂冬青顶断裂段以及武威 - 天祝隐伏断裂等共同作用的结果, 是古浪推覆体发生整体运动的结果, 破裂点呈弥散状, 遍及整个古浪推覆体, 只是各个地区或各条断裂的地震破裂方式有差别[15]。1927 年古浪 8 级地震后 10 个月余震发生 9 次, 5.0~5.9 级 7 次, 6.0~6.9 级 2 次, 分布在距离主震 10 km 范围内(历史地震定位有可能不准), 这和 1920 年海原的 8 1/2 级地震后余震分布不同。之后减震时段海原断裂带 5 级以上活动较弱, 6 级以上地震至今已经平静

100年,而古浪地震震中区在1929年4月至1984年1月平静55年多后,5级以上地震活动较活跃(图3),这和两个8级地震的发震构造有关。

## 5. 结论与讨论

本文通过对1900年以来祁连山地震带7级以上强震发生后震中区范围内5级以上地震的发生情况,得到以下规律:

1) 1900年以来祁连山地震带7级以上强震发生后5级以上地震活动出现了增震效应和减震效应,强震后1~6年震中区100~220 km范围内5级地震活动增强,表现为:强震发生后23~56年震中区100~220 km范围内5级地震活动减弱,表现为减震效应,减震时段是增震时段的几倍。该统计规律表明在短期内原震区是能量快速释放的时段,而后的几十年间原震区能量释放缓慢阶段,5级地震活动处于较平静状态。本文对祁连山地震带7级以上强震衰减特征进行了分析,表明7级以上地震的衰减具有相同的特征,今后如果扩大研究范围进行分析总结,将对于5级以上地震活动的预测提供参考。

2) 1900年以来祁连山地震带的5次7级以上强震的最大余震震级符合巴特余震震级定律。

3) 由于发震构造的不同,1920年海原的8 1/2级地震和1927年古浪8级地震的余震活动特征存在较大差异。

## 基金项目

宁夏回族自治区自然科学基金项目“宁夏及邻区5级以上地震的特征和危险性预测”(2021AAC03481)资助。

## 参考文献

- [1] Mogi, K. (1981) Earthquake Prediction, Maurice Ewing VI. AGU, Washington DC, 1-348.
- [2] 张国民, 傅征祥. 华北地震的时间分布及其物理解释[J]. 地球物理学报, 1984, 28(6): 569-578.
- [3] 霍茨. 科学家们认为每次大地震都会引起另一次地震[J]. 国际地震动态, 1995(3): 36.
- [4] 陈绍绪. 唐山地震的孕育和强震的增震作用[J]. 华北地震科学, 1996(2): 1-9.
- [5] 傅征祥, 刘桂萍, 陈棋福. 青藏高原北缘海原、古浪、昌马大地震间相互作用的动力学分析[J]. 地震地质, 2001, 23(1): 3-42.
- [6] Maji, M., Sen, S., Prosad, B., et al. (1979) On Stress Accumulation in the Lithosphere and Interaction between Two Strike-Slip Faults. *Mausam*, **30**, 359-363. <https://doi.org/10.54302/mausam.v30i2.3056>
- [7] 郭增建, 秦保燕. 大震重复性与减震作用[J]. 西北地震学报, 1984, 6(4): 95-96.
- [8] 黄福明, 陈修启. 大震广义影响场的讨论[J]. 地震学报, 1992, 14(4): 400-406.
- [9] Cornell, C.A., Wu, S.C., Winterstein, S.R., et al. (1993) Seismic Hazard Induced by Mechanically Interactive Fault Segments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, 436-449. <https://doi.org/10.1785/BSSA0830020436>
- [10] 鄢家全, 贾素娟. 大地震减震作用研究综述[J]. 国际地震动态, 1994(8): 1-3.
- [11] 陈兵, 江在森, 车时, 等. 玛尼 7.9 级地震对昆仑山口西 8.1 级地震的触发作用及动力背景初探[J]. 中国地震, 2003, 19(1): 1-7.
- [12] 张国民, 李丽. 强震成组孕育成组发生过程中相互间影响的研究[J]. 地震, 1997, 17(3): 221-231.
- [13] 罗国富, 马永青, 杨明芝, 等. 特大地震对震源邻区的增(减)震作用的研究[J]. 中国地震, 2007, 23(4): 393-399.
- [14] 吴开统, 焦远碧, 吕培苓, 等. 地震序列概论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- [15] 郑文俊, 袁道阳, 张冬丽, 等. 1927年古浪8级地震的破裂习性及其破裂机制的数值模拟[J]. 中国地震, 2004, 20(4): 353-363.