

王霞,宋美琴,郭文峰,等. 2022. 1989年大同一阳高震群的库仑应力相互作用研究[J]. 地震研究, 45(4): 560–569, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0053.

Wang X, Song M Q, Guo W F, et al. 2022. Possible Coulomb stress interactions between the three main earthquakes in the 1989 Datong–Yanggao earthquake swarm[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(4): 560–569, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0053.

1989年大同一阳高震群的库仑应力相互作用研究*

王霞¹, 宋美琴^{1*}, 郭文峰¹, 陈慧¹, 方强²

(1. 山西省地震局, 山西太原 030021; 2. 信阳市生态环境局光山分局, 河南光山 465450)

摘要: 通过计算1989年大同一阳高震群序列中5.7、5.9、5.6级3次地震的同震静态库仑应力, 分析不同断层参数对库仑破裂应力的影响, 并结合震群序列的分布和扩展方式, 定量研究3次地震之间的触发关系。结果显示: 5.7级地震可能是NW向左旋走滑, 之后5.9级地震发生右旋走滑, 震群活动为一组共轭剪切破裂的结果, 并触发了后续地震。综合分析3次地震的时空分布与库仑应力变化的关系, 推测1989年大同一阳高震群可能的发震机制为: ①在区域应力场增强的背景下, 2条共轭的发震断层均接近破裂临界水平, 屈服应力较低的NW向团堡断裂先发生破裂; ②随后触发NE向大王村断裂破裂, 且以NE向破裂为主, 这与区域应力场方向一致; ③研究区域接收断层的有效摩擦系数比较高, 在0.4以上; ④5.9级地震的发生, 触发了西南区域的地震序列, 东南区域的地震序列可能受5.9级地震的影响, 并受控于断层的摩擦系数。总体而言, 这3次 $M > 5.5$ 地震之间存在着一一定的触发关系, 5.9级地震对周边断层有明显的触发作用。

关键词: 库仑应力; 应力触发; 有效摩擦系数; 大同一阳高震群

中图分类号: P315.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2022)04-0560-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0053

0 引言

1989年10月19日山西大同一阳高发生5.9级地震, 它不仅是华北第四活跃期(1815年平陆6 $\frac{3}{4}$ 级地震至今)山西地区发生的最大地震, 也是山西地区有史料记载以来最大的震群型地震。5.9级地震前2小时4分发生5.7级地震, 震后又有多多个5级以上地震发生, 最大地震震级5.6, 与5.9级地震相隔仅1小时19分。1991年3月26日、1999年11月1日和2010年4月4日在原震中区又先后发生了5.8级、5.6级、 $M_L 5.0$ 地震序列, 且微震

时有发生。多位学者研究发现, 大同一阳高震区小震的发生对山西断陷带乃至晋冀蒙交界地区中强地震具有较好的震兆指示作用(啜永清, 1995, 1999; 啜永清等, 1999; 大同一阳高地地震烈度宏观考察组, 1991), 称为“地震窗口”效应, 这成为监视该区域中强地震的有效手段。值得关注的是, 自1999年11月1日大同阳高5.6级地震后, 晋冀蒙交界地区5级以上地震持续平静21年, 远超1950年以来最长平静时间间隔。2019年以来该地区先后出现地震条带、地震空区、小震活动增强等一系列异常现象^{①②③}, 地震危险性进一步增大。

针对大同一阳高地区中强地震序列, 诸多学

* 收稿日期: 2022-01-18.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划(XH200403Y)、山西省科技厅面上青年基金(201901D211548)、中国地震局地质所国家野外站研究课题(NORSTY2021-01)、山西省科技攻关项目(20140313023-1)、山西省应用基础研究计划(201801D121030)和国家自然科学基金(41874053, 42030108)联合资助。

第一作者简介: 王霞(1987-), 高级工程师, 主要从事地震活动性和综合分析等研究。

E-mail: 365372858@qq.com.

通讯作者简介: 宋美琴(1968-), 研究员, 主要从事地震活动性分析预测等研究. E-mail: smq28@126.com.

① 山西省地震局. 2020. 2018年2月以来大同及周边地区 $M_L \geq 3.0$ 地震空区异常分析报告.

② 山西省地震局. 2020. 2019年以来山西北部至晋冀蒙交界 $M_L \geq 3.0$ 地震活动显著增强异常分析报告.

③ 山西省地震局. 2021. 2021年1月1日至2021年7月3日山西中北部地震条带交汇分析报告.

者开展了震群频次映震能力、序列衰减活动(啜永清, 1995, 1999; 啜永清等, 1999; 王霞, 宋美琴, 2017)、地壳介质品质因子和视应力(王霞, 宋美琴, 2017; 王霞等, 2017a, b)、地震重定位和发震构造(冯永革等, 2016)、地震分布与深部速度结构关系(徐扬等, 1997; 张成科等, 1998; 靳玉科等, 2010; 胥鸿睿, 2018; 王霞等, 2019)等研究。但由于该震群的断层参数、背景地震活动性、主震的震源特性等存在着很大的不确定性, 因此地震序列之间的相互作用关系仍不清楚, 人们对其发震断层的特征、地震间的相互作用和触发机制以及发震机理的认识还存在很大不足, 直接影响了该地区地震危险性评估的准确性。

目前, 学者们主要通过库仑破裂应力的变化来研究不同地震之间的相互关系, 确定潜在的地震危险性。Stein 等(1997)和 Nalbant 等(1998)通过计算土耳其和北爱琴海地区的强震静态库仑应力并基于应力转移计算其发震概率, 认为土耳其伊兹米特地区为强震发生的高概率区域。1999 年伊兹米特发生了 7.4 级地震, 其研究结果得到了验证。基于地震破裂引起的静态库仑破裂应力变化分析余震序列分布、地震应力触发关系已经在很多震例中得到了应用(Toda *et al.*, 2002, 2008; Lin, Stein, 2004; Freed, 2005; 万永革等, 2008, 2009; 单斌等, 2013; 靳志同等, 2019; 黄禄渊等, 2019)。对断层上地震的相互触发的分析(Shan *et al.*, 2008, 2013a, b)以及主震对余震的触发影响等的分析(Shan *et al.*, 2011), 在认识地震序列的发震机制以及可能的地震危险性方面发挥了重要作用。

1989 年大同—阳高震群已过去多年, 观测资料相对不足, 其发震构造和地震之间的相互关系研究也很少, 对其发震构造和地震危险性了解较为薄弱。冯永革等(2016)利用库仑应力触发关系给出了 1989 年大同—阳高 5.7 级、5.9 级和 5.6 级 3 次地震可能的破裂模型, 但是由于没有分析断层的参数, 以及地震的破裂方向和特征, 难以对该震群的触发关系进行定量探讨。鉴于此, 本文首先从静态库仑应力作用来研究 1989 年大同—阳高震群的多次中强震的应力触发关系, 进一步分析其破裂方向与破裂特征, 进而探

讨该区域多次中强震应力触发、应力对震群活动的影响、发震的物理机制等。

1 区域地震地质背景及震群分布

1989 年大同—阳高震群活动位于汾渭裂谷北部的大同盆地, 控制盆地的主要边界断裂有口泉断裂、恒山北麓断裂、六棱山北麓断裂、阳高一·天镇断裂。该震群发生在大同盆地东侧控盆断裂——六棱山北麓断裂与盆地内次级断裂(团堡断裂和大王村断裂)的交汇处(图 1)。其中六棱山北麓断裂全长 150 km, 为总体走向 NEE、倾向 NW、倾角 70° 左右的正断层; 团堡断裂为全长约 50 km, 走向 NW 40° , 倾向 NE 或 SW 的高倾角正断层; 大王村断裂全长约 48 km, 总体走向 NE 45° , 倾向 SE, 倾角 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。1989 年大同—阳高 5.9 级地震的发震断层为大王村断裂, 5.7 级和 5.6 级地震的发震断层为团堡断裂(山西省地震局, 2004)。

1989 年大同—阳高震群重定位和震源机制解综合研究结果显示(Zhuo *et al.*, 2019): 该序列成椭圆形分布, 其椭圆主轴走向为 NE 22.5° , 与宏观地震破坏考察结果一致(大同—阳高地震烈度宏观考察组, 1991); 震群震源机制解主要节面走向为 NE $17.6^{\circ} \sim 24.7^{\circ}$, 与震中序列椭圆主轴走向相吻合。大同—阳高震群所处的山西地区北段现今震源机制解的张应力轴方位为 NW $20^{\circ} \sim 40^{\circ}$, 与卫星影像获得的晚新生代以来山西地区南段和北段的伸展方向(NW $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$)一致(Zhuo *et al.*, 2019), 表明晚新生代至今山西地区北段的构造运动一直受到稳定的区域应力场控制。这与山西省地震局(2004)由震源机制解推断的大同—阳高地震的震源应力场一致, 即主压应力轴平均为 NE 70° , 主张应力轴平均为 160° , 应力轴仰角接近水平, 受控于水平应力场作用, 震源错动为走滑方式。

精确定位结果显示大同—阳高震群序列主体呈 NE 向分布, 后期少部分序列呈 NWW 向分布(宋美琴等, 2012)(图 1)。为便于表述这 3 次地震后后续小震的时空演化特征, 本文将 5.7 级地震至 5.9 级地震间发生的小震称为 5.7 级地震

序列, 5.9 级地震到 5.6 级地震间发生的小震称为 5.9 级地震序列, 5.6 级地震之后的小震称为 5.6 级地震序列。由图 2 可见, 5.7 级地震序列以 5.9 级地震序列为中心沿 NE 向两侧发育, 5.6 级地震序列则向外围有所扩散, 与山西省地震局 (2004) 判定的序列优势方向一致, 序列精定位

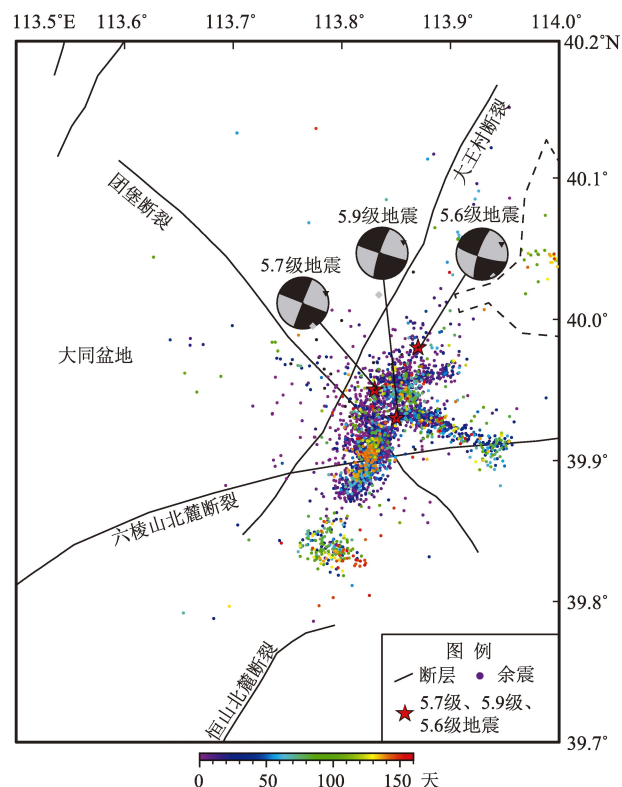


图 1 1989 年大同—阳高震群区域地质构造及地震序列分布

Fig. 1 The 1989 earthquake swarm and geological structures in Datong – Yanggao region

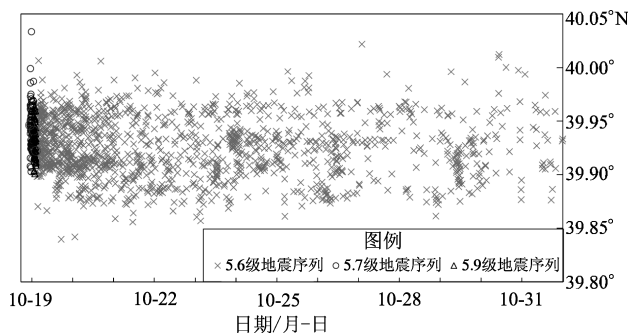


图 2 1989 年大同—阳高震群活动随时间的变化

Fig. 2 The activity of the 1989 Datong – Yanggao earthquake swarm in the latitude direction along with time

结果及时空演化过程为判定发震断层、确定触发关系提供了基础参考。

2 研究方法及参数选取

2.1 研究方法

本文基于实验室的岩石破坏库仑破裂准则 (Jaeger *et al.*, 2009) 计算库仑应力:

$$CFS = \tau + \mu(\sigma_n - p) \quad (1)$$

式中: CFS 为库仑应力; τ 和 σ_n 分别为断层面上的剪应力和正应力, 拉伸为正、压缩为负; μ 为岩石摩擦系数; p 为流体孔隙压力。静态库仑应力的变化表达式为:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n \quad (2)$$

式中: ΔCFS 为库仑应力变化量; $\Delta\tau$ 和 $\Delta\sigma_n$ 为断层面上的剪应力变化量和正应力变化量, 方向与上述的正应力方向的定义相同; μ' 为有效摩擦系数。当计算值为负值时, 表示该应力变化抑制断层的破裂, 发生地震的可能性降低, 此区域称为应力影区; 相反则促使断层破裂, 则可能触发地震, 地震发生的危险性增大。

2.2 地震破裂参数

由于大同—阳高震群的 3 次 $M > 5.5$ 地震的时间间隔约为 2 h (表 1), 因此本文选取弹性层地壳结构来研究其同震库仑应力。本文综合考量该区域多个研究结果给出的流变学参数, 来确定合理的层状模型 (表 2)。在库仑应力计算过程中, 有效摩擦系数 μ' 的选取主要考虑了两点: 一是结合前人研究结果, 逆断层相比走滑断层对正应力变化更敏感, 逆断层取 $\mu' > 0.4$, 走滑断层取 $\mu' < 0.4$ (Freed *et al.*, 2007), 考虑到研究区断层多数是正断兼走滑型, 本文选取中间值 $\mu' = 0.4$ 进行测试; 二是根据已有研究的经验取值 (Li *et al.*, 2015; 石富强等, 2020)。由于 μ' 对库仑破裂应力影响比较大, 本文对比分析低 ($\mu' = 0.1$)、中 ($\mu' = 0.4$) 和高 ($\mu' = 0.7$) 3 种不同摩擦系数情况下的库仑应力变化。

大同—阳高震群的 3 次 $M > 5.5$ 地震的断层破裂参数参考龙锋等 (2006) 方法, 通过定位精度较高的序列分布并结合烈度区展布综合分析得到 (表 1),

表 1 1989 年大同—阳高震群的 3 次地震的震中及破裂参数

Tab. 1 Parameters of the 3 large earthquakes in the 1989 Datong – Yangao sequence

发震时间		震级	震中位置		震源深度/km	破裂长度/km	破裂宽度/km	平均位错/m
年-月-日	时:分		$\lambda_{\text{E}}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{N}}/(^{\circ})$				
1989-10-18	22:57	5.7	39.95	113.83	12	7	12	0.238
1989-10-19	01:01	5.9	39.93	113.85	14	10	12	0.459
1989-10-19	02:20	5.6	39.98	113.87	12	13	11	0.046

5.7 级和 5.6 级地震的地震矩来自 CMT 的结果，5.9 级地震的地震矩来自刘瑞丰等（1995）的结果，通过地震矩张量公式 $M_0 = \mu LS$ 计算出平均位错，见表 3。

本文分别收集了不同机构和学者测定的 1989 年大同—阳高震群的 3 次 $M > 5.5$ 地震的震源机制解，分别为 6、7、6 个。为了从上述多个震源机制解中确定一个合适的震源参数进行后续分析，本文应用万永革（2019）的方法获取由多个震源机制解来确定中心解，结果引自王霞等（2021）的研究结果（表 3）。

表 2 研究区介质模型参数

Tab. 2 Parameters of the medium models in the study area

分层	深度/km	$V_{\text{P}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$V_{\text{S}}/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{km} \cdot \text{m}^{-3})$
沉积层	0	2.66	1.192 6	2 550
上地壳	2	5.50	3.32	2 670
	7	6.10	3.41	2 670
中地壳	14	6.35	3.49	2 800
下地壳	23	6.55	3.56	2 800
	31	6.60	3.63	2 900
上地幔	48	8.00	4.309 1	3 300

表 3 1989 年大同—阳高震群 3 次地震的震源机制解中心解

Tab. 3 Focal mechanism solutions for the 3 large earthquakes in the 1989 Datong – Yangao sequence

地震事件	节面 I			节面 II			地震矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)
	走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$	走向/ $(^{\circ})$	倾角/ $(^{\circ})$	滑动角/ $(^{\circ})$	
5.7 级	201.46	88.80	-179.62	111.45	89.62	-1.2	1.42×10^{17}
5.9 级	198.23	82.19	-177.11	107.83	87.13	-7.82	12.125×10^{17}
5.6 级	198.82	77.95	-169.55	106.62	79.78	-12.24	1.45×10^{17}

3 研究结果

基于前文的发震断层面、介质层状模型等参数，本文采用 PSGRN/PSCMP 程序（Wang *et al.*, 2006）计算了大同—阳高震群 3 次 $M > 5.5$ 地震所引起的静态同震库仑破裂应力变化。

从表 1 可见，3 次地震的发震时间间隔约为 2 h，5.7 级和 5.9 级地震序列地震偏少（图 3），但仍可以看出总体序列优势分布方向呈 NE 向，仅有少部分小震分布在 NW 向。5.9 级地震的发震断层为 NE 向大王村断裂（山西省地震局，2004），而 5.7 级地震序列的地震数量偏少难以判断其发震断层走向，5.6 级地震序列难以与 5.9 级地震序列区分，也很难判断其发震断层走

向；由于震源机制解的共轭性质，也难以判断发生在哪一个断层走向上。因此，本文假定 NE 向

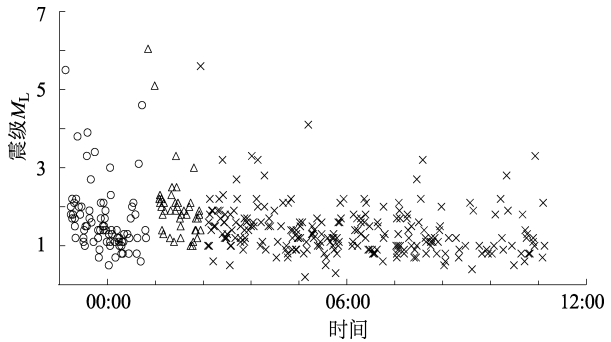


图 3 1989 年 10 月 18 日 22 时—10 月 19 日 10 时大同—阳高地震序列 $M-t$ 图

Fig. 3 $M-t$ of the Datong-Yanggao earthquake sequence from 22:00, October 18 to 10:00, October 19, 1989

或 NW 向都可能是发震断层走向, 分别计算了 5.7 级地震的 NE 向破裂和 NW 向破裂对 5.9 级地震的同震静态库仑应力作用, 以及 5.9 级地震的 NE 向破裂对 5.6 级地震的 NE 向和 NW 向接收的同震静态库仑应力效应。

3.1 5.7 级地震对 5.9 级地震同震静态库仑应力

本文以表 3 中 5.7 级地震的两个节面参数分别作为破裂面进行计算。5.7 级地震发生后, 其后的小震序列震源深度平均值约为 10 km, 因此计算 5.7 级地震的 10 km 深处对其周围应力场的同震静态库仑应力作用。为了对比分析断层 μ' 对库仑破裂应力的影响, 分别计算了 μ' 为 0.1、0.4 和 0.7 时 5.7 级地震对周边断层的影响, 结果如图 4 所示, 图中震源机制解为 5.7 级地震, 黄色圆圈分别为 5.9 级地震和 5.6 级地震。

由图 4 可知, 对于 5.7 级地震, μ' 造成的库仑应力变化并不大, 只是在序列南部和北部部分库仑应力减小区域变成增强区域。总体来看, 不论 μ' 取值如何, 在选取 NE 向的节面 I 为 5.7 级地震破裂面时, 序列中绝大多数小震都位于库仑破裂应力影区, 其后 2 h 内只有 9% 左右的地震位于应力增强区; 而以 NW 向的节面 II 为破裂面时, 情况有较大变化: 当 $\mu' = 0.1$ 时, 只有小部分地震位于库仑应力增强区; 当 $\mu' \geq 0.4$, 超过 30% 的地震分布在库仑应力增加区; 当 $\mu' = 0.7$ 时, 地震分布比 $\mu' = 0.4$ 时更接近库仑应力增强区。以上表明 5.7 级地震为 NW 向破裂可能性大, 这与冯永革等 (2016) 认为 5.7 级地震的发震断层走向更有可能是 NWW 方向的认识比较一致。

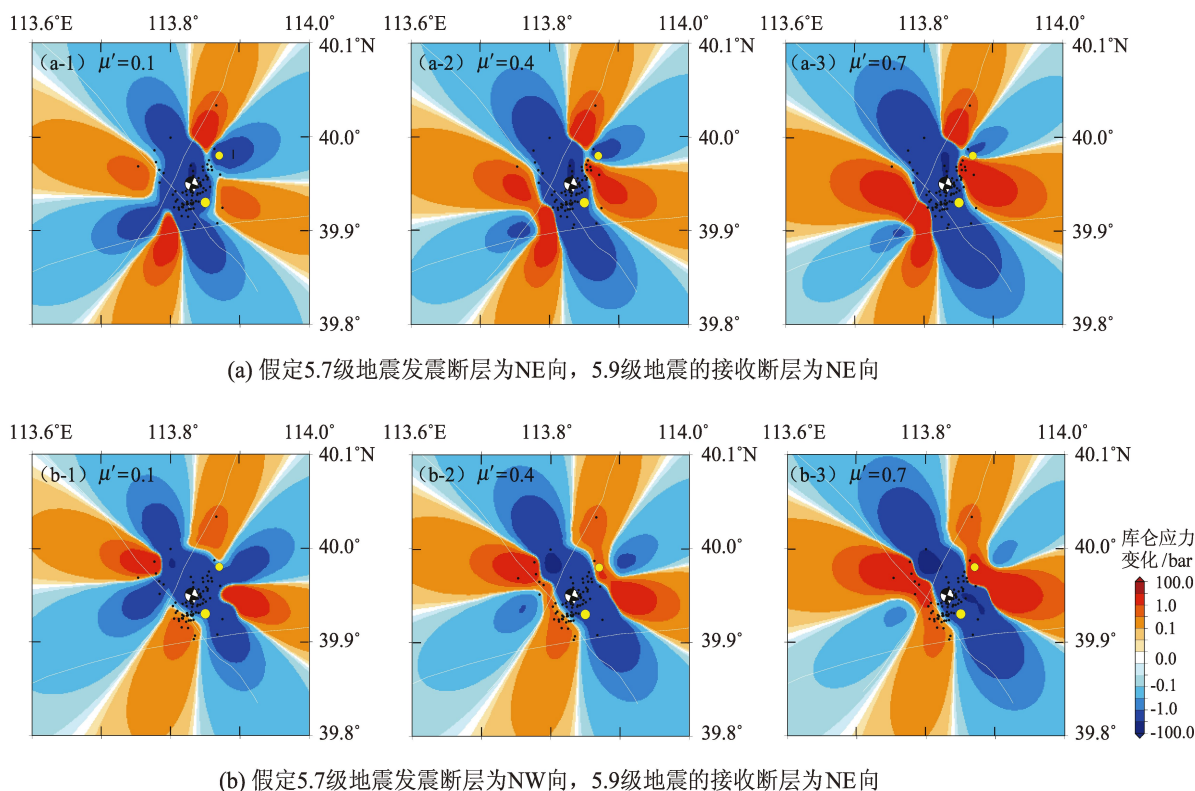


图 4 1989 年大同—阳高 5.7 级地震引起的 5.9 级地震接收断层库仑破裂应力变化

Fig. 4 Changes of Coulomb failure stress on the receiving fault of the M5.9 shock caused by the 1989 Datong – Yanggao M5.7 shock

3.2 5.9 级地震对 5.6 级地震同震静态库仑应力

在 5.9 级地震发生后 1 h, 又发生了 5.6 级地震和一系列中小地震, 理清二者的关系是认识震群发震过程和应力传输的关键。由于 5.6 级地震序

列的分布走向不明显, 利用震源机制难以确定其哪一个节面为发震断层, 因此本文分别以 5.6 级地震的两个节面参数作为发震破裂面, 并以此作为接收断层, 计算 5.9 级地震对 5.6 级地震的库仑破

裂应力。宋美琴等 (2012) 研究表明, 5.9 级地震后的小震序列震源深度平均值约为 14 km, 因此本文计算 5.9 级地震的 14 km 深度上同震静态库仑应力作用, 分别计算了 μ' 为 0.1、0.4 和 0.7 时库仑应力的变化情况 (图 5)。

图 5 表明, 不同 μ' 对 5.9 级地震引起的库仑应力变化有较明显的影响。当 μ' 较小时, 无论接收断层的走向取 NE 还是 NW 向, 5.9 级地震后的序列展布与库仑破裂应力变化的分布相似性都相对较低 (图 5), 西南和东南象限的一部分地震在库仑应力增强区, 但有很大一部分地震处在库仑破裂应力的影区。随着 μ' 的增加, 分布在库仑应力增强区的地震数目明显增多。因此, 和 5.7 级地震引起 5.9 级地震区域的应力场改变的情况一样, 随着接收断层的 μ' 增高, 地震序列分布与库仑破裂应力的变化趋势更为吻合。因此, 可以推测认为该区域的断层 μ' 比较高, 在 0.4 以上。当 $\mu' = 0.4$ 时, 5.6 级地震以 NE 向的节面 I 为接收断层时, 5.9 级地震对其后序列触发比例为 28%; 以 NW 向节面 II 为接收断层时, 5.9

级地震对其后序列的触发比例为 25% (图 5)。触发比例低的原因可能是多数小震集中在 5.9 级地震附近, 落在 5.9 级地震破裂影区内; 由于触发比例相近, 且存在 5.9 级和 5.6 级地震震间隔较近、定位精度以及共轭断裂的活动方式等问题, 难以通过静态库仑应力的方法判断其破裂面。无论哪个节面作为接收断层, 5.6 级地震均落在 5.9 级地震破裂产生的库仑应力正负值边界附近。

5.7 级、5.9 级、5.6 级地震序列随时间变化结果 (图 2) 显示: 3 次序列均为以 5.9 级地震为中心, 沿 NE 走向的大王村断裂向 SW 和 NE 两侧扩展, 为双侧破裂特征; 可能是由于共轭断裂相交处应力水平最高, 远离交叉点的地方其应力也逐渐递减, 即 3 次地震位于相交处, 因此其后续地震多数向两侧扩展; 但距离 5.9 级地震 1 个月后发生的一小部分地震序列呈 NWW 向分布 (图 1)。这与 5.9 级地震的同震库仑应力形成的加载区沿 NE 向的大王村断裂走向、NWW 向加载区较为一致, 部分地震序列落在加载区内。

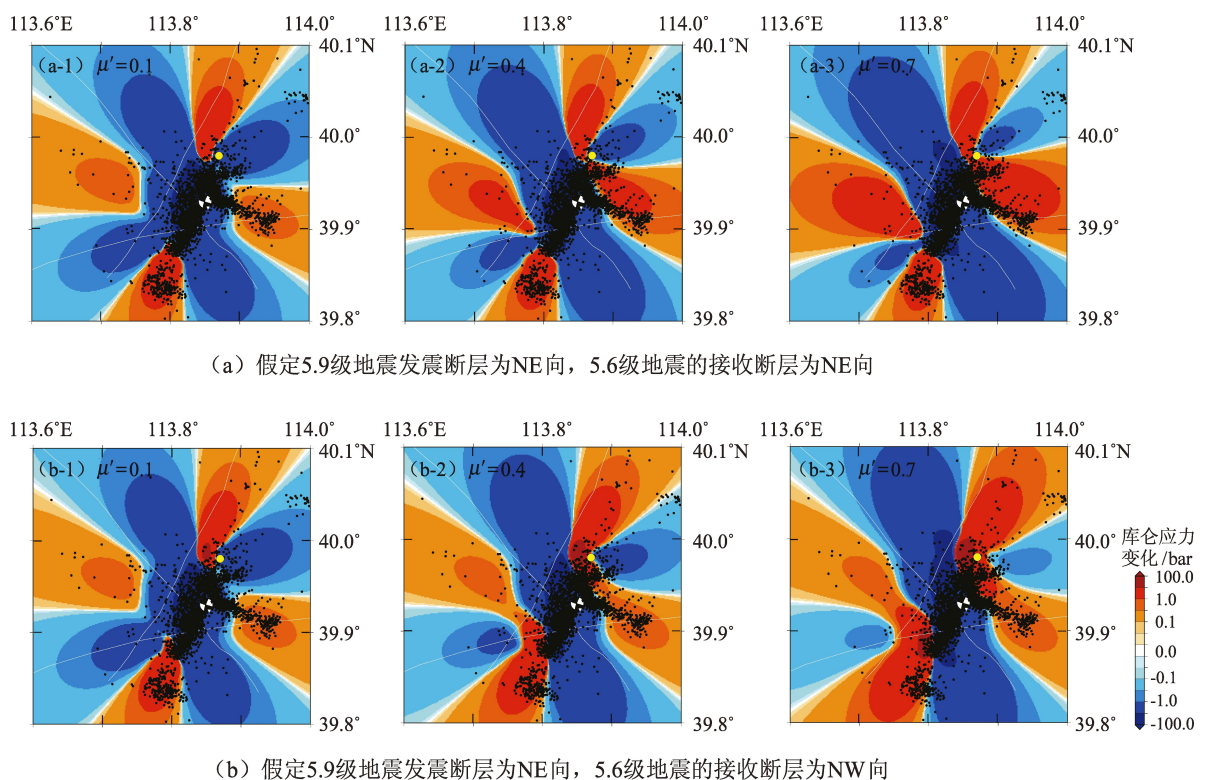


图 5 1989 年大同—阳高 5.9 级地震 NE 向破裂面引起的 5.6 级地震接收断层库仑破裂应力变化
Fig. 5 Changes of Coulomb stress on the receiving fault of the 1989 $M5.6$ shock caused by the NE-oriented rupture of the 1989 Datong – Yanggao $M5.9$ shock

4 讨论

4.1 大同一阳高震群同震库仑应力触发作用

库仑破裂应力随 5.9 级地震和接收断层的走向以及 μ' 的大小变化而变化,通过研究发现:①随着 μ' 的增大,有更多的地震分布在库仑破裂应力增强区,表明该区域 5.9 级地震和 5.6 级地震的发震断层的 μ' 比较大,应该在 0.4 以上;②从 5.7 级地震序列和库仑破裂应力分布来看,5.7 级地震的发震断层取 NW 向时,吻合度明显提高,结合冯永革等 (2016) 的研究结果,认为 5.7 级地震的发震断层为 NW 走向比较合理;③5.9 级地震对 5.6 级地震有明显的触发作用, μ' 取 0.4 时,有 25% 以上的 5.9 级地震序列分布在库仑应力增加区,且当 μ' 增大时,分布在库仑应力增加区的地震数量增多,其中 NWW 向序列分支落在其中一个库仑应力加载区中心;其余没发生在应力增加区的地震,主要发生在 5.9 级地震的破裂区附近,此时其后的地震序列的发生与库仑应力变化关系不是很大;因此,5.9 级地震对 5.6 级地震的触发作用比较明显。

由于 5.6 级地震后的小震分布在两条明显的共轭断层上,因此接收断层的走向取 NW 和 NE 方向,但结果差别不明显。两个共轭断层上分布的地震多数都发生在库仑应力增强区,据此认为 5.9 级地震还是对两条共轭断层上的地震有触发作用。

5.7 级地震的库仑应力变化与 5.9 级地震序列的对应性不高,虽然 5.7 级地震发震断层采用 NW 走向时,有部分地震分布在应力增强区,但整体上多数地震还是发生在应力影区。造成这种情况可能主要有两个原因:① 5.7 级和 5.9 级地震发震时间 (约 2 h) 和震中位置间隔 (约 2.8 km) 均很近,因此,很多地震受 5.7 级地震同震破裂应力变化的影响更大,主要发生在 5.7 级地震震区附近,而距离 5.9 级地震一定距离的地震还未被触发;② 5.7 级地震的震级较小,应力改变量不是很大。因此,不能简单认为 5.7 级地震对 5.9 级地震无明显触发作用,而是受限于时间和空间的分布。

大同一阳高震群 5.7 级地震和 5.9 级地震对后续地震序列的总体触发比例不高,一方面可能是

因为后续地震序列主要分布在这两次地震的震源区附近,大部分地震发生在库仑应力卸载区;另一方面是地震的触发机制比较复杂,5.9 级地震的应力触发、震后余滑、震后中下地壳介质黏弹性松弛效应等因素有关 (Hill *et al.*, 1993; Freed *et al.*, 2007; Perfettini, Avouac, 2007; 贾若, 蒋海昆, 2014; 朱琳等, 2021), 如贾若和蒋海昆 (2014) 发现汶川地震主震破裂面上有约 50% 的余震活动可能与震后余滑及黏弹性松弛等因素有关, Perfettini 和 Avouac (2007) 对 1992 年美国加州 Landers 地震也有类似的认识。因此 1989 年震群对后续地震活动的影响因素应结合黏弹性、震后余滑等进一步探讨。

4.2 大同一阳高震群同震库仑应力触发机制

2019 年发生美国南加州 Ridgecrest M_w 7.1 地震,主震震前 34 h 的 M_w 6.4 前震为左旋走滑性质,对右旋走滑的主震起到触发作用,表明静态库仑应力在正交断层系统破裂中发挥重要的作用 (William *et al.*, 2019)。余震呈“L”型分布,前震以 NE 向展布为主,主震以 NW 向展布为主,且地震序列分布总体以 NW 向为主,这可能受控于其地质构造动力过程。在加州的右旋板块边界作用下,右旋断层比左旋断层积累和释放剪应力更快,且初始应力显示左旋断层比右旋断层的屈服应力水平低。2 次地震破裂时间接近,表明两条断裂已经接近破裂水平,且屈服应力较低的断层先发生破裂,破裂产生的应力变化促使屈服应力高的断层趋于不稳定而破裂 (Lozos, Harris, 2020), M_w 6.4 前震 NE 向左旋走滑,触发 M_w 7.1 主震 NW 向右旋走滑。类似正交断层活动的还有 1987 年美国加州 Superstition Hills 地震序列,先发生 M_w 6.2 前震,后发生 M_w 6.6 主震,形成“L”型分布余震特征;2012 年印度洋序列、日本等地区均有类似现象 (Zachary *et al.*, 2019)。

大同一阳高震群的 5.7 级地震和 5.9 级地震的同震静态库仑应力结果显示,5.7 级地震更可能是 NW 向左旋走滑,5.9 级地震右旋走滑,两次地震的发震断层呈共轭活动特点,从而触发了后续地震。3 次地震的时间间隔约为 2 h,根据 2019 年美国加州 Ridgecrest M_w 7.1 地震和其他地区类似地震的触发机制,推测大同一阳高震群的发震断层接近破裂临界水平,在 NE 向挤压和

NW 向拉张的区域应力场控制下, 先发生 NW 向破裂, 随后触发 NE 向破裂, 且以 NE 向破裂为主, 并在 NE 向区域主压应力的控制作用下, 发生了大同—阳高震群。

4.3 大同—阳高震群发震过程

由大同—阳高震群 3 次 $M \geq 5.5$ 地震的多个震源机制解确定的中心解结果 (表 3, 图 1) 可见, 这 3 次地震的震源机制解均为走滑型, 且基本一致, 5.7 级地震节面走向为 NW 向的左旋走滑, 5.9 级地震节面走向为 NE 向的右旋走滑, 可能为同一的构造应力场作用下的近乎原地复发的多个地震的共轭错动方式。结合震源位置、发震顺序和序列时空演化特点, 推测认为 5.7 级地震发生在 NW 向团堡断裂上, 经过短暂应力调整后进入相对平静期 (序列不发育), 破裂过程中触发了相交的 NE 向大王村断裂, 继而引发了 5.9 级地震, 在同一构造应力场的作用下, NE 向地震破裂面在后续长时间的应力调整过程中引发了一系列余震 (余震序列主体为 NE 向), 与冯永革等 (2016) 提出的前震沿 NWW 向发生左旋破裂、5.9 级地震和 5.6 级地震沿 NNE 方向发生右旋破裂的模型基本吻合。另外, 由于山西地堑总体呈 NE 向延伸, 这与其区域应力场作用密切相关, 而大同—阳高震群正是在此区域应力场控制作用下发生, 因此震群活动主体优势展布方向也呈 NE 向。

5 结论

基于 1989 年大同—阳高震群的 3 次 $M > 5.5$ 地震的震源破裂参数, 本文对比研究了 5.7 级地震的 2 个节面对 5.9 级地震断层面上库仑应力变化的影响, 以及 5.9 级地震对 5.6 级地震震源机制解不同节面上引起的库仑应力变化, 主要得出以下结论:

(1) 发震断层的走向对库仑破裂应力变化影响较大, 综合库仑破裂应力变化和余震分布, 推测 5.7 级地震为 NW 向破裂的可能性较大。

(2) 有效摩擦系数对库仑破裂应力变化有较明显的作用, 研究区域断层 μ' 比较高, 大于 0.4。

(3) 5.9 级地震对 5.6 级地震有较明显的触发作用, 5.9 级地震的应力场在 5.6 级地震两个共轭断层面上都产生了库仑应力增加, 对应了两个主

要的地震分布带。

(4) 库仑破裂应力变化受 5.6 级地震的接收断层影响较小, 这主要是其后的地震分布在两条共轭断层上, 而共轭断层在应力场上很大程度是等效的。

(5) 大同—阳高震群的发震断裂为 NE 向大王村断裂和 NW 向团堡断裂, 该震群沿 NW 向团堡断裂先发生破裂, 然后与区域应力场主压应力方向一致的 NE 向大王村断裂很快也发生破裂, 且余震序列以 NE 向分布为主。

本文着重讨论的是 1989 年震群的 3 次主要地震事件的库仑应力变化及其影响, 对后续发生的多次强震是否具备应力触发等还需进一步分析。

感谢防灾科技学院万永革教授、陕西省地震局石富强高级工程师、山东省地震局崔华伟高级工程师对本文相关研究工作的热心帮助。

参考文献:

- 吸永清, 刘巍, 彭美焯. 1999. 大同—阳高地震的余震与华北北部较大地震的关系[J]. 地震, 19(4): 379–386.
- 吸永清. 1995. 大同—阳高地震的余震窗口[J]. 山西地震, (1): 20–24.
- 吸永清. 1999. 大同—阳高地震的余震窗口特征及机理分析[J]. 山西地震, (3): 25–30.
- 大同—阳高地震烈度宏观考察组. 1991. 1989 年大同—阳高 6.1 级地震烈度宏观考察[J]. 山西地震, (3): 18–30.
- 冯永革, 王海洋, 陈永顺, 等. 2016. 1989—1999 大同地震序列的隐伏断层研究: 库仑应力分析和余震 JHD 重定位[J]. 地球物理学报, 59(2): 568–577.
- 黄禄渊, 程惠红, 张怀, 等. 2019. 2008 年汶川地震同震—震后应力演化及其对 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震的影响[J]. 地球物理学报, 62(4): 1268–1281.
- 贾若, 蒋海昆. 2014. 基于同震库仑应力变化的汶川地震余震频次研究[J]. 中国地震, 30(1): 74–90.
- 靳玉科, 梁向军, 靳玉贞, 等. 2010. 大同震区地震序列震源位置及震源区速度结构初探[J]. 山西地震, (3): 1–6.
- 靳志同, 万永革, 刘兆才, 等. 2019. 2017 年九寨沟 $M_s 7.0$ 地震对周围地区的静态应力影响[J]. 地球物理学报, 62(4): 1282–1299.
- 刘瑞丰, 李鸿吉, 陈培善, 等. 1995. 大同地震序列的震源机制解[J]. 地震地磁观测与研究, 16(2): 30–36.
- 龙锋, 闻学泽, 徐锡伟. 2006. 华北地区地震活断层的震级—破裂长度、破裂面积的经验关系[J]. 地震地质, 28(4): 511–535.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2013. 2013 年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1002–1009.
- 山西省地震局. 2004. 山西大同—阳高地震[M]. 北京: 地震出版社.

- 石富强,张辉,邵志刚,等. 2020. 华北地区库仑应力演化与强震活动关系[J]. 地球物理学报,63(9):3338–3354.
- 宋美琴,郑勇,葛黎,等. 2012. 山西地震带中小震精确定位及其显示的山西地震构造特征[J]. 地球物理学报,55(2):513–525.
- 万永革,沈正康,盛书中,等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响[J]. 地震学报,31(2):128–139.
- 万永革,沈正康,曾跃华,等. 2008. 唐山地震序列应力触发的黏弹性力学模型研究[J]. 地震学报,30(6):581–593.
- 万永革. 2019. 同一个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.
- 王霞,宋美琴,李宏伟,等. 2017a. 大同地震窗 P 波频散衰减的异常变化特征[J]. 地震工程学报,39(2):1–8.
- 王霞,宋美琴,李宏伟,等. 2017b. 同窗视应力时变特征浅析[J]. 地震地磁观测与研究,38(5):33–38.
- 王霞,宋美琴,郑勇,等. 2019. 山西及邻区壳幔速度图像特征及其构造意义[J]. 地震地质,41(1):119–136.
- 王霞,宋美琴. 2017. 大同窗地震活动的频次和应变能特征[J]. 中国地震,33(2):340–349.
- 王霞,宋美卿,陈慧,等. 2021. 山西大同—阳高 $M > 5.5$ 地震震源机制中心解的确定[J]. 山西地震,(3):1–4.
- 胥鸿睿. 2018. 鄂尔多斯块体东缘横波速度结构及各向异性研究[D]. 武汉:中国地质大学.
- 徐扬,田勇,啜永清,等. 1997. 大同—阳高 6.1 级震群震源区及其附近地区地壳三维 P 波速度结构反演[J]. 山西地震,(2):25–29.
- 张成科,张先康,盖玉杰,等. 1998. 大同—阳高震区及其邻区壳幔速度结构与深部构造[J]. 地震地质,20(4):391–398.
- 朱琳,李腾飞,石富强,等. 2021. 1976 年唐山强震震后库仑应力演化及其与 2020 年古冶 5.1 级地震的关系[J]. 地震研究,44(1):1–8.
- Freed A M, Ali S T, Burgmann R. 2007. Evolution of stress in Southern California for the past 200 years from coseismic, postseismic and interseismic stress changes[J]. Geophys J Int, 169:1164–1179.
- Freed A M. 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 33(1):335–367.
- Hill D P, Reasenberg P A, Michael A, et al. 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California earthquake[J]. Science, 260(5114):1617–1623.
- Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R W. 2009. Fundamentals of rock mechanics[M]. Oxford: John Wiley & Sons, 90.
- Li B, Mathilde B S, Kuvvet A. 2015. Coulomb stress evolution in the Shanxi rift system, North China, since 1303 associated with coseismic, post-seismic and interseismic deformation[J]. Geophysical Journal International, 203(3):1642–1664.
- Lin J, Stein R S. 2004. Stress triggering in thrust and subduction earthquakes and stress interaction between the southern San Andreas and nearby thrust and strike-slip faults[J]. J Geophys Res, 109(B2):B02303.
- Lozos J C, Harris R A. 2020. Dynamic rupture simulations of the $M_6.4$ and $M_7.1$ July 2019 Ridgecrest, California, earthquakes[J]. Geophysical Research Letters, 47(7):e2019GL086020.
- Nalbant S S, Hubert A, King G C. 1998. Stress coupling between earthquakes in northwest Turkey and the north Aegean Sea[J]. J Geophys Res, 103(B10):24469–24486.
- Perfettini H, Avouac P. 2007. Modeling afterslip and aftershocks following the 1992 Landers earthquake[J]. J Geophys Res, 112(B5):B07409.
- Shan B, Xiong X, Wang R J, et al. 2013a. Coulomb stress evolution along Xianshuihe – Xiaojiang Fault System since 1713 and its interaction with Wenchuan earthquake, May 12, 2008[J]. Earth and Planetary Science Letters, 377–378(2013):199–210.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2008. Stress changes on major faults caused by $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake, May 12[J]. Sci China Ser D – Earth Sci, 52(5):593–601.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2011. The co-seismic Coulomb stress change and expected seismicity rate caused by 14 April 2010 $M_s = 7.1$ Yushu, China, earthquake[J]. Tectonophysics, 510(3):345–353.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2013b. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake, and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake[J]. Science China: Earth Sciences, 56(7):1169–1176.
- Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. 1997. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering[J]. Geophys J Int, 128(3):594–604.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 2008. 12 May 2008 $M = 7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems[J]. Geophys Res Lett, 35(17):L17305.
- Toda S, Stein R S. 2002. Response of the San Andreas fault to the 1983 Coalinga Nuñez earthquakes: An application of interaction-based probabilities for Parkfield[J]. J Geophys Res, 107(136):ESE 6–1–ESE 6–16.
- Wang R, Lorenzo – Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP – a new code for calculating co- and postseismic deformation, geoid and gravity changes based on the Viscoelastic – Gravitational Dislocation Theory[J]. Computers & Geosciences, 32(4):527–541.
- William D B, Gavin P H, Ryan D G. 2019. The July 2019 Ridgecrest, California Earthquake Sequence: Kinematics of Slip and Stressing in Cross-Fault Ruptures[J]. Geophysical Research Letters, 46(21):11859–11867.
- Zachary E R, Benjamn I, Zhe J, et al. 2019. Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence[J]. Science, 366(6463):346–351.
- Zhuo Y Q, Guo Y S, Bornyakov A S, et al. 2019. A test of the oblique-rifting model for transfer zone deformation in the northern Fen-Wei rift: implications from the 1989 $M_6.1$ Datong – Yanggao earthquake swarm[J]. Geodynamics and tectonophysics, 10(1):43–51.

Possible Coulomb Stress Interactions between the Three Main Earthquakes in the 1989 Datong – Yanggao Earthquake Swarm

WANG Xia¹, SONG Meiqin¹, GUO Wenfeng¹, CHEN Hui¹, FANG Qiang²

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

(2. Guangshan Branch of the Xinyang Ecological Environment Bureau, Guangshan 465450, Henan, China)

Abstract

We calculated the co-seismic static Coulomb stress changes of the $M5.7$ earthquake, the $M5.9$ earthquake and the $M5.6$ earthquake in the 1989 Datong – Yanggao earthquake swarm, and analyzed the effects of different fault parameters on the Coulomb stress field, and quantitatively investigated the triggering relationships among these earthquakes by combining the distribution patterns of the aftershock sequences. The results show that the $M5.7$ shock may have been characterized by NW left – lateral strike – slip, followed by NE right – lateral strike – slip of the $M5.9$ shock, with conjugate activity of the seismogenic fault, and triggered the subsequent aftershocks. A comprehensive analysis of the distribution of events and the Coulomb stress changes suggests that the possible seismogenic mechanisms of the 1989 Datong – Yanggao earthquake swarm are: ①In the context of the enhanced regional stress field, the 2 conjugate seismogenic faults were both close to the critical state of failure, and the NW – oriented Tuanbao fault ruptured firstly with lower yield stress; ②The NE – oriented Dawangcun fault was subsequently triggered rupture, and the NE – oriented rupture was predominant. The main aftershocks were distributed in NE direction, which was consistent with the direction of the NE principle compressive stress; ③The effective friction coefficients of the receiving faults in the study area were relatively high (over 0.4); ④The $M5.9$ earthquake triggered the aftershocks in the southwest region, and the aftershocks in the southeast region may be influenced by the $M5.9$ earthquake, and was controlled by the friction coefficient of the fault. Generally, there was a trigger relationship between the three $M > 5.5$ earthquakes, and the $M5.9$ shock had a significant triggering effect on the surrounding faults.

Keywords: Coulomb stress; stress triggering; effective coefficient of friction; the Datong – Yanggao earthquake swarm