

# 1976年唐山强震群震后库仑应力演化及其 与2020年古冶5.1级地震的关系\*

朱琳<sup>1</sup>, 李腾飞<sup>2</sup>, 石富强<sup>1\*</sup>, 石军<sup>1</sup>, 邵辉成<sup>1</sup>

(1. 陕西省地震局, 陕西 西安 710068; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 采用能够综合协调长期变形和震后短期变形的 Burgers 流变模型, 模拟了 1976 年唐山强震群引起的震后形变场以及同震和震后库仑应力变化。结果显示: 1976 年唐山强震群中主震的两个破裂面以及滦县和宁河两次强余震均对 2020 年古冶 5.1 级地震表现为库仑应力加载。岩石圈粘弹性松弛效应引起的库仑应力变化显示, 震后 15 年前后, 库仑应力演化状态呈现显著的差异性: 震后 15 年内, 库仑应力变化剧烈; 而震后 15 年后, 库仑应力呈现缓慢的稳定增加状态。该过程与唐山强震群余震区地震活动过程相似, 可能暗示 1976 年唐山强震群余震区应力调整过程已基本稳定。

**关键词:** 古冶地震; 唐山地震; 库仑应力; Burgers 流变模型

**中图分类号:** P315.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2021)01-0001-08

## 0 引言

1976 年唐山 7.8 级地震是新中国成立以来发生在人口密集的华北地区一次最为强烈的地震, 造成 24 万余人的死亡和巨大的财产损失。唐山地震发生在 NE 走向的唐山断裂带上 (虢顺民等, 1977), 该断裂带分为南北两段: 北段主要由陡河断裂、唐山—巍山—长山南坡断裂和唐山—古冶断裂构成, 南段主要由唐山—丰南断裂和唐山—古冶断裂构成 (尤惠川等, 2002)。唐山强震群包括 1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震主震、7 月 28 日滦县 7.1 级地震及 11 月 25 日宁河 6.9 级地震。在 1976 年前的 400 多年间滦县断裂段上发生过 5 次中强地震, 而唐山地震主震破裂影响了相邻的滦县断裂段原有的、相对平稳的地震复发行 (闻学泽, 马胜利, 2006)。唐山 7.8 级地震发生后 15 h 左右, 在滦县发生  $M_s$  7.1 地震; 震后约 3.5

个月, 即 11 月 15 日在主震破裂的西南方向发生宁河  $M_s$  6.9 地震。据中国地震台网测定, 2020 年 7 月 12 日, 在 1976 年唐山强震群余震区发生古冶 5.1 级地震, 震源深度 10 km。万永革 (2019) 根据其综合震源机制解方法, 给出了本次地震的震源机制<sup>①</sup>, 古冶 5.1 级地震震源机制主要表现为右旋走滑, 其中走向  $238.69^\circ$ , 倾角  $76.76^\circ$ , 滑动角  $-172.58^\circ$ 。该地震和 1976 年唐山地震的关系已成为社会关注的热点话题。

目前, 对于唐山强震群研究已有较丰富的成果, 如 Huang 和 Yeh (1997) 基于精密水准观测和三角测量数据, 利用数值模拟给出了唐山强震群的同震破裂模型, Robinson 和 Zhou (2005) 据此讨论了唐山地震主震和强余震之间的触发机制。万永革等 (2008b) 基于 Maxwell 流变模型, 在 Huang 和 Yeh (1997) 位错模型基础上讨论了库仑应力变化与余震活动空间分布的关系, 库仑应力计算结果与余震活动吻合率达 95%。

\* 收稿日期: 2020-07-01.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划 (XH21032) 和震情跟踪合同制任务 (2020010218) 联合资助.

第一作者简介: 朱琳 (1988-), 工程师, 主要从事地壳形变分析预报工作. E-mail: 568460719@qq.com.

✱ 通讯作者简介: 石富强 (1984-), 高级工程师, 主要从事地壳动力学和运动学相关数值模拟工作.

E-mail: shifuqiang121@163.com.

① Seismology 小组. 2017. <https://mp.weixin.qq.com/s/UsLoE-TGsL09SK6Yy0sLuA>.

库仑应力作为强震发震地点预测的一种方法,在余震触发机制方面有着广泛的应用和研究。事实上,余震的发生机制复杂,与主震的应力触发、主震震后余滑或周边介质粘弹性松弛效应等引起的局部应力状态调整有关。因此,关于强震后一定时间内,震源区及邻近区域发生的中小地震是否属于该强震的余震序列及其持续时间 (Stein, Liu, 2009) 一直是科学家们关注的焦点。针对强震后的显著中强地震事件归属问题,刘桂萍和傅征祥 (2002) 讨论了 1973 年炉霍 7.6 级地震对最大余震的库仑应力触发。炉霍主震对 5.3 级余震的库仑应力加载达 53 bar, 应该为应力触发引起的强余震活动; 单斌等 (2012) 讨论了 2010 年玉树 7.1 级地震对 2011 年囊谦 5.2 级地震的影响, 认为囊谦地震应该是一次独立事件, 不受玉树地震触发影响。针对强震后震源区附近的序列归属及其发震机制问题, 贾若和蒋海昆 (2014) 基于库仑应力讨论了 2008 年汶川 8.0 级地震余震活动频次, 认为与同震库仑应力变化相关的余震约占 45% ~ 48%, 主震破裂面上还有约 50% 的余震可能与粘滑或震后形变松弛相关; 缪森和朱守彪 (2013) 研究认为 2013 年芦山 7.0 级地震余震序列复杂, 包含有芦山地震和汶川地震的双重触发作用; 邵志刚等 (2009) 以 1999 年中国台湾集集 7.6 级地震为例, 讨论了主震和余震震源类型不同情况下, 主震对余震的库仑应力触发机制, 认为有必要进一步考虑更加符合实际的介质模型和断层模型。蒋长胜等 (2013) 基于 ETAS 模型研究唐山地震余震序列归属问题时, 指出如果能辅之以库仑应力计算讨论, 将得到更多的信息。为进一步认识 2020 年古冶 5.1 级地震的孕震背景, 本文结合库仑应力计算和余震活动序列分析, 讨论该地震和 1976 年唐山地震的关系。

## 1 模型建立

### 1.1 方法介绍

库仑应力的本质是岩石破坏库仑破裂准则 (Jaeger *et al.*, 2009)。考虑到地壳绝对应力状态获取困难 (Hergert, Heidbach, 2011), 研究人员通过一系列假定 (Skempton, 1954; Rice, Cleary, 1976; Rice, 1992; Harris, 1998), 将库仑破裂准则简化

为常见的库仑应力表达 (King *et al.*, 1994):

$$\Delta CFS = \Delta \tau + \mu' \Delta \sigma_n \quad (1)$$

式中:  $\Delta \tau$ 、 $\Delta \sigma_n$  分别为指定断层面上的剪应力变化和正应力变化;  $\mu'$  为断层有效摩擦系数, 与断层介质物性、流体侵入等相关, 表征断层阻碍块体相对运动变形的能力, 同时也可能与断层类型 (Syed Tabrez *et al.*, 2008) 和滑动速率 (Parsons, Dreger, 2000) 相关。计算程序采用汪荣江教授开发的 PSGRN/PSCMP (Wang *et al.*, 2006)。

### 1.2 介质模型

岩石圈介质物性参数中弹性参数参考前人研究 (沈正康等, 2004; 张群伟, 朱守彪, 2019) 给出, 见表 1。震后形变研究工作表明 (Broerse *et al.*, 2015), 岩石圈流变性质对区域地壳形变有显著影响 (Huang *et al.*, 2014)。考虑到 Kelvin 体和 Maxwell 体在表征短期变形和长期变形方面的缺陷 (图 1), 本文采用能够综合协调短期变形和长期变形的 Burgers 体 (邵志刚等, 2007) 模拟华北地区库仑应力演化, 其中表征短期变形的 Kelvin 体粘滞系数参考唐山地震震后形变模拟结果 (孙荀英等, 1994), 表征长期变形的 Maxwell 体粘滞系数参考震间应力场模拟的结果 (柳畅等, 2012), 见表 1。

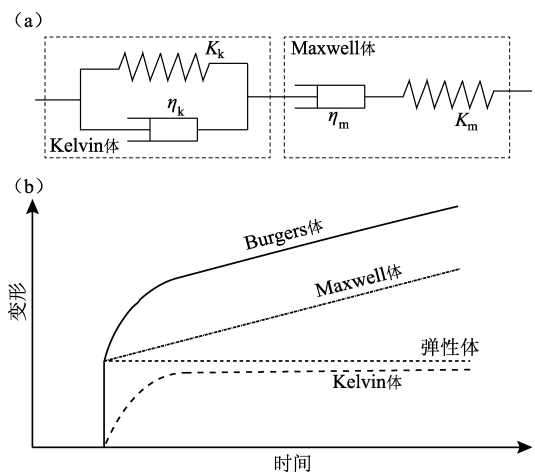


图 1 Burgers 流变模型 (a) 及其与 Maxwell 体和 Kelvin 体的变形模式对比 (b)

(据 Caron *et al.*, 2014)

Fig. 1 Diagram of Burgers rheology (a) and its deformation mechanism that compare with Maxwell and Kelvin rheologies (b)

(based on Caron *et al.*, 2014)

表1 岩石圈介质模型参数

Tab. 1 Mechanical properties of the Lithosphere

序号	岩石圈分层	厚度/km	P波速度/(km·s <sup>-1</sup> )	S波速度/(km·s <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	$\eta_k$ /(Pa·s)	$\eta_m$ /(Pa·s)
1	沉积层	4.2	4.82	2.78	2 600	$\infty$	$\infty$
2	上地壳	11.1	5.91	3.42	2 700	$\infty$	$\infty$
3	中地壳	10.0	6.30	3.64	2 800	$\infty$	$\infty$
4	下地壳	15.0	6.75	3.90	3 000	$7.10 \times 10^{18}$	$3.00e \times 10^{20}$
5	上地幔	—	8.00	4.38	3 300	$2.10 \times 10^{19}$	$2.00 \times 10^{21}$

1.3 位错模型

根据 Huang 和 Yeh (1997) 的研究, 唐山地震的破裂过程复杂, 主震可以分为两个破裂段 (以下简称“主震-1”和“主震-2”), 发震断层均为高倾角走滑断层, 且以右旋走滑为主, 同震位错量约为 3~4 m。滦县余震为正断型地震, 正倾滑位错达到 2 m。宁河余震以左旋走滑为主, 兼有一定的正断分量 (图 2)。本文的库仑应力计算就采用了该位错模型 (Huang, Yeh, 1997; Robinson, Zhou, 2005), 具体参数见表 2。

表2 唐山强震群同震位错模型

Tab. 2 Coseismic dislocation model of the Tangshan strong earthquake swarm

地震	震中位置		走向/	倾角/	滑动角/	长度/	宽度/	平均位
	$\varphi_N/(^\circ)$	$\lambda_E/(^\circ)$	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	( $^\circ$ )	km	km	错/m
主震-1	39.51	118.17	185	82	170	24	20	3.75
主震-2	39.67	118.28	35	78	-160	24	20	3.30
滦县余震	39.82	118.68	272	54	-90	18	16	2.12
宁河余震	39.45	117.87	299	61	-25	20	16	0.93

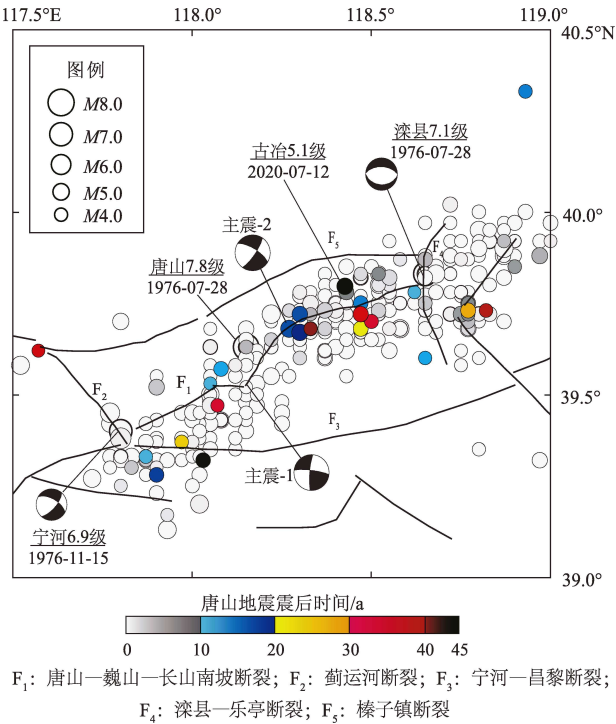


图2 1976年唐山强震群附近构造及余震活动时空分布

Fig. 2 Geological structure and aftershocks distribution around the 1976 Tangshan earthquake swarm area

2 计算结果

笔者基于上述 Burgers 流变模型和唐山强震群位错模型, 计算了研究区 10 km 深度的库仑应力值, 接收断层为古冶地震的发震断层。同震库仑应力计算结果 (表 3) 显示: 唐山强震群在本次古冶地震震源区产生的库仑应力加载显著。其中主震-2 产生的库仑应力加载达 23.45 bar, 远远大于库仑应力触发阈值 (0.1 bar) (King *et al*, 1994)。震后岩石圈粘弹性松弛引起的库仑应力计算结果 (图 3) 显示: 唐山地震主震两个破裂段以及滦县和宁河两次强余震对古冶地震震源区的库仑应力依然保持加载作用, 经过 44 年的震后松弛, 除宁河余震外, 唐山地震主震两个破裂段和滦县余震产生震后库仑应力变化也均达到通常认为的库仑应力触发阈值 (0.1 bar) (King *et al*, 1994), 累积震后库仑应力加载可达 0.85 bar。从震后库仑应力演化时间过程 (图 3) 看, 受岩石圈流变性质影响, 地震后数年至十年尺度, 古冶地震震源区库仑应力变化剧烈, 表现出快速的非线性增加, 表明该时间段内区域地壳变形调整过程剧烈; 震后 15~20 年左右, 古冶地震震源区库仑应力变化

逐渐趋于稳定, 呈现缓慢的、近似线性的增加, 这是由于区域地壳变形调整过程趋于稳定, 受 Maxwell 体控制, 岩石圈变形逐渐趋近于稳定、长期变形。

表 3 唐山强震群对古冶地震的同震库仑应力加载

Tab. 3 Coseismic Coulomb stress loading of Tangshan strong earthquake swarm on Guye earthquake

地震	主震-1	主震-2	滦县余震	宁河余震
同震库仑应力加载/bar	1.804	23.450	1.115	0.063

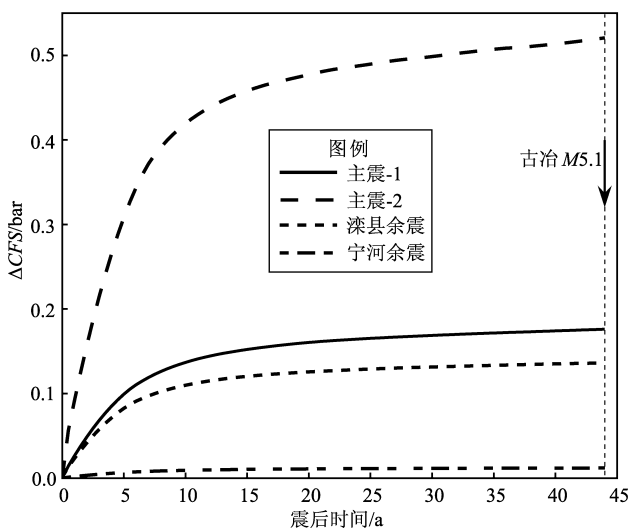


图 3 唐山强震群对古冶地震的震后库仑应力加载时间演化

Fig. 3 Temporal evolution of the postseismic Coulomb stress loading of Tangshan strong earthquake swarm on Guye earthquake

为进一步讨论唐山强震群对古冶地震的动力作用过程, 我们给出了唐山地震主震两个破裂段和滦县、宁河两次强余震分别在古冶地震发震断层上产生的正应力和剪应力变化, 并结合模拟同震形变场对该动力作用过程进行分析。近 SN 走向、以右旋走滑破裂为主的主震破裂南段 (主震-1), 在其北东方向的古冶地震震源区产生的同震位移显著, 整体表现为 SW 向运动, 且断层南侧运动位移量高于其北侧位移量 (图 4a)。从图 4a 可以看出, 主震-1 在古冶地震断层面剪应力增加显著, 而正应力变化较小, 整体上有利于促进以右旋走滑为主的古冶地震的发生。

NE 走向、以右旋走滑破裂为主的破裂北段

(主震-2), 在其北东端古冶地震震源区产生的同震位移最为显著且区域变形特征复杂。在古冶地震发震断层南侧表现为 SWW 向运动, 而在其北侧, 表现为 NNW 向运动, 这样的变形在 NE 走向的古冶地震发震断层上将产生 NE 向的右旋剪切和 NW 向的拉张作用 (图 4b)。从图 4b 可见, 主震-2 在古冶地震断层面的剪应力和正应力变化均非常显著, 有利于促进古冶地震的发生。相比于主震两个破裂段, 滦县余震对古冶地震的影响较弱。近 EW 走向、正倾滑破裂的滦县余震, 在其西南侧的古冶地震震源区的同震位移场也较为复杂。在古冶地震发震断层北侧, 同震位移场不显著, 而在其南侧, 同震位移场主要表现为向 SSW 的拉张, 该拉张作用 SW 向分量有利于古冶地震发震断层的右旋滑动, 而 SE 向分量则有利于古冶地震发震断层的拉张破坏 (图 4c)。从图 4c 可见, 滦县余震在古冶地震断层面的正应力变化显著, 剪应力也有所增强, 有利于促进古冶地震的发生。

由于宁河余震与古冶地震震中位置的空间距离较远, 且震级较小, 宁河余震对古冶地震的影响最弱。从图 4d 可见, 宁河余震在古冶地震断层面的剪应力和正应力变化均为正值, 对古冶地震的发生有一定应力加载作用。

### 3 讨论

#### 3.1 有效摩擦系数

断层摩擦系数作为库仑应力计算中的一个不确定参数, 大多数学者都会讨论其敏感性, 讨论结果大多认为其仅对个别断层有一定影响。大多数断层摩擦系数的改变只会影响库仑应力变化的相对大小 (Wan, Shen, 2010; 石富强等, 2017; 张群伟, 朱守彪, 2019), 一般不会影响其极性改变。为保证计算结果的可靠性, 本文增加了有效摩擦系数为 0.1 和 0.7 两种情况, 讨论其对库仑应力计算结果的影响 (图 5)。图 5 显示, 当有效摩擦系数为 0.1, 0.4 和 0.7 时, 古冶地震发震断层库仑应力均为正值, 且随着有效摩擦系数增加而增大。Robinson 和 Zhou (2005) 讨论了唐山地震主震的两个破裂段和两次强余震的动力触发作用, 结果表明, 对于宁河余震, 当断层有效摩擦系数大于 0.5 时, 唐山地震主震的两个破裂段对宁河余

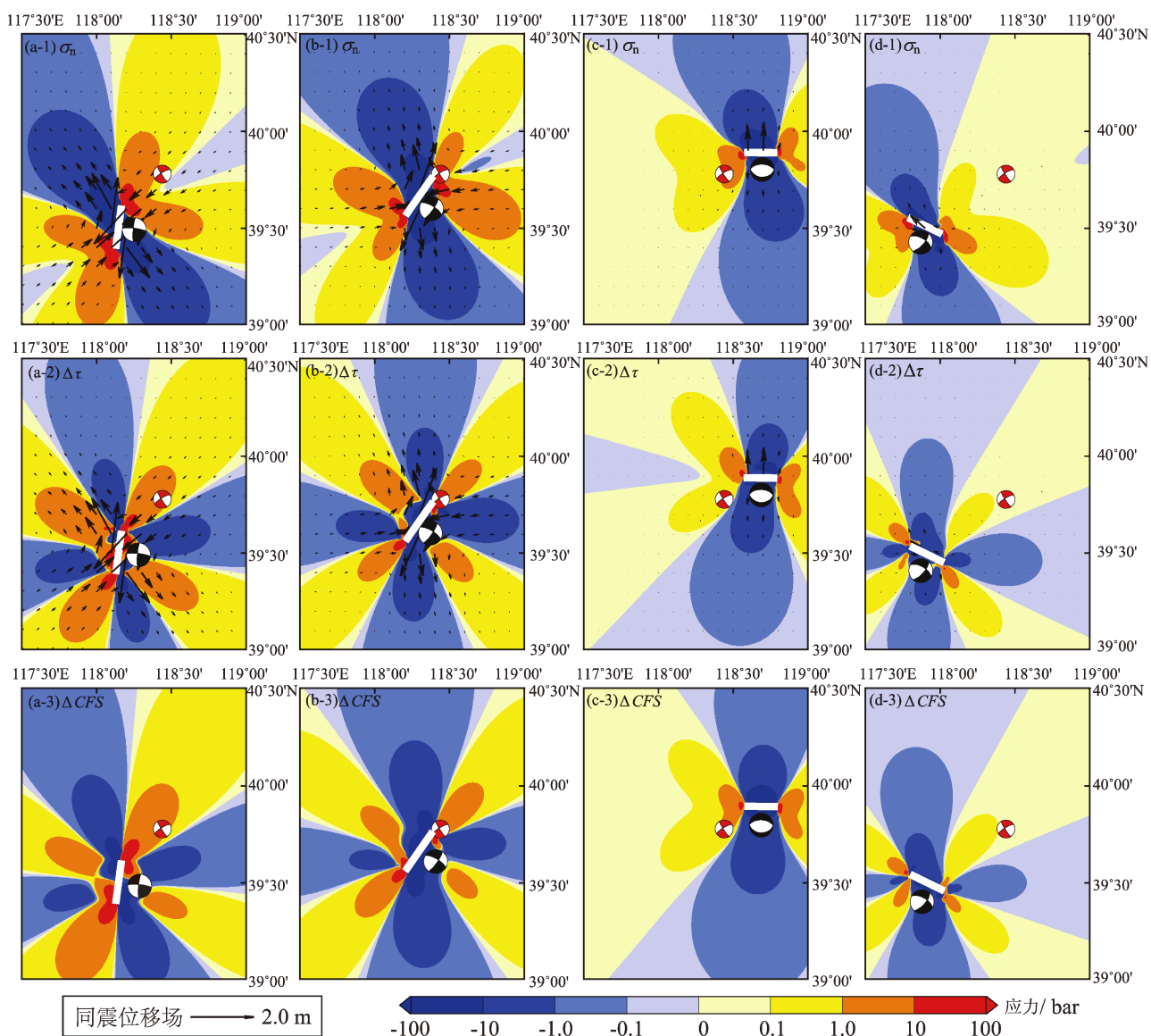


图4 唐山地震主震-1 (a), 主震-2 (b), 和滦县 (c), 宁河 (d) 2次余震对古冶地震的应力作用

Fig. 4 Stress loading of the Mainshock -1 (a), Mainshock -2 (b) of Tangshan earthquake, Luanxian aftershock (c), Ninghe aftershock (d) on Guye earthquake

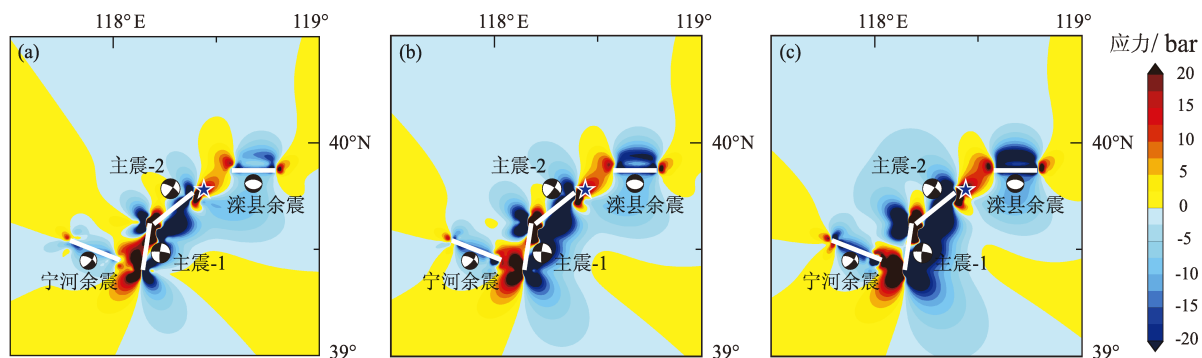


图5 有效摩擦系数分别为0.1 (a), 0.4 (b), 0.7 (c) 时对古冶地震断层面库仑应力的影响

Fig. 5 Impact of the effective friction coefficient of 0.1 (a), 0.4 (b), 0.7 (c) on the Coulomb stress loading on the fault plane of Guye earthquake

震表现为库仑应力加载。考虑到古冶地震发生在唐山余震区的事实以及构造的相关性,本文认为古冶地震发震断层有效摩擦系数可能与宁河余震断层面有效摩擦系数接近,因此本文以 0.4 为有效摩擦系数讨论相关结果是可靠的。

### 3.2 唐山地震余震区地震活动

考虑华北地区地震完整性(徐伟进,高孟潭,2014),笔者选取中国地震台网速报目录记录的唐山强震群余震区 4 级以上地震(图 2、图 6a),计算了 1976 年 7 月 28 日以来该区地震活动的能量蠕变(图 6b)和累积频度(图 6c),结果显示唐山强震群发生后数十年尺度,余震活动水平快速衰减,可能具有一定的构造意义。时间上,从震后 15~20 年(1991—1996 年)开始,唐山强震群余震区 4 级以上地震活动水平显著降低,并呈现出准周期性的成组活动特征。空间上,4 级以上地震主要集中在唐山地震主震区的北东段和滦县余震区附近(张素欣等,2020)。2020 年古冶 5.1 级地震,在时间上与 2019 年 12 月 5 日发生在唐山余震区的丰南 4.5 级地震组成新一组活动。

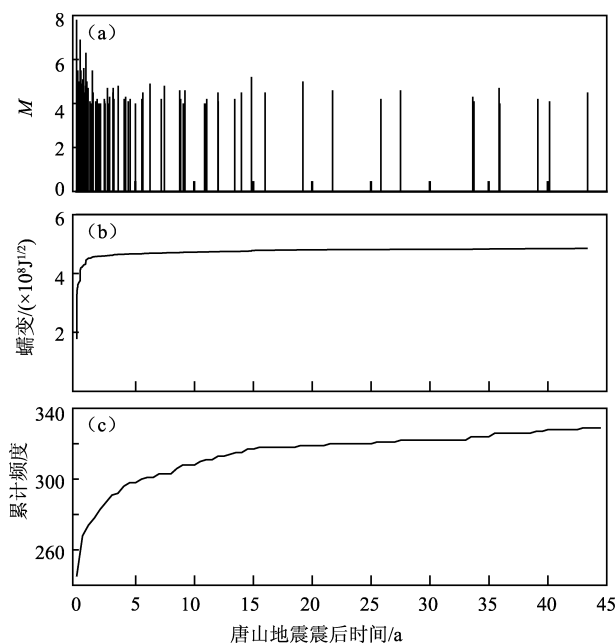


图 6 唐山强震群余震活动 (a) 及其能量蠕变 (b) 和累积频度 (c) 曲线

Fig. 6 Aftershock activity of the Tangshan strong earthquake swarm (a) and the corresponding energy creeping (b) and cumulated frequentness (c)

对比唐山地震后岩石圈粘弹性松弛模拟结果(图 3), 15~20 年的时间尺度可能是唐山强震群余震活动的一个时间分界点。通常来说,强震后,震源区余震活动主要受主震破裂引起的震源区局部应力环境变化、震后松弛变形引起的震源区的应力动态调整以及主震破裂面的余滑或者粘滑等因素控制。本文模拟结果显示,尽管同震和震后库仑应力加载均非常显著,达到触发阈值,但 15~20 年尺度的时间分界现象表明,古冶地震与唐山强震群的关系可能比较复杂,古冶地震没有发生在 23.45 bar 的同震库仑应力加载时刻,也没有发生在震后松弛变形剧烈的数年至十年尺度内。库仑应力计算结果还与发震断层位错模型有关,万永革等(2008a, 2017)基于小震精定位和形变资料反演的唐山地震同震位错显示,1976 年唐山强震群对古冶地震震中的库仑应力影响为 -16 bar,表现为卸载,该结果与 Huang 和 Yeh (1997) 的结果有一定差异。张素欣等(2020)对唐山地震余震区中等地震活动的时空演化特征进行分析后发现,1996 年以来,唐山地震主震震源区基本无 4 级以上地震发生,认为该时段余震活动已经不受主震引起的局部应力状态变化所制约,这与本文的模拟结果认识一致。

由余震持续时间统计结果可见,余震持续时间与断层滑动速率相关。Stein 和 Liu (2009)指出唐山地震余震持续时间至少为 34 年,其主要依据是 Shen 等(2000)基于 GPS 给出的唐山断裂滑动速率约为 2 mm/a。而基于重复地震(Li *et al.*, 2007)和地震地质研究结果(楚全芝,汪良谋,1994),唐山断裂滑动速率可达 2.6 或 2.9 mm/a,这就意味着唐山地震余震持续时间可能小于 34 年。基于 ETAS 模型序列归属问题的研究表明:2010 年以来,唐山地震震源区发生的 3 次  $M_L \geq 4$  地震的背景地震概率分别为 0.72, 0.88 和 0.76,表明它们作为 1976 年唐山地震余震的可能性已经非常低,更接近于背景地震活动(蒋长胜等,2013)。结合库仑应力计算结果的时空演化和序列累积频度及蠕变曲线,笔者认为古冶 5.1 级地震为 1976 年唐山地震余震的可能性较小,至少可以认为不是受局部应力状态调整的余震活动。而 2020 年古冶 5.1 级地震的孕震动力学过程,是否受控于其他动力源,还需进一步研究。

## 4 结论

根据前人给出的1976年唐山强震群的震源位错模型,本文采用能够综合协调长期变形和震后短期变形的Burgers流变模型,计算唐山强震群在2020年古冶5.1级地震震源区产生的库仑应力变化,并结合唐山地震余震序列得到以下主要结论:

(1) 唐山强震群在古冶5.1级地震破裂面产生的同震库仑应力加载显著。考虑岩石圈粘弹性松弛效应引起的库仑应力变化显示,震后15年前后,库仑应力演化状态呈现显著的差异性:震后15年内,库仑应力变化剧烈;震后15年后,库仑应力呈现缓慢的稳定增加状态。

(2) 古冶5.1级地震震源处库仑应力演化过程与唐山强震群余震活动过程相似,可能暗示1976年唐山强震群余震区应力调整过程已基本稳定。

综合分析认为,2020年古冶5.1级地震为1976年唐山地震余震的可能性较小,至少可以认为不是受局部应力状态调整的余震活动。

## 参考文献:

- 楚全芝,汪良谋. 1994. 华北地区构造应力场、断层滑动速率与强震的关系[J]. 华北地震科学, 12(1): 9-20.
- 魏顺民,李志义,程绍平,等. 1977. 唐山地震区域构造背景和发震模式的讨论[J]. 地质科学, (4): 305-321.
- 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.
- 蒋长胜,吴忠良,庄建仓. 2013. 地震的“序列归属”问题与ETAS模型——以唐山序列为例[J]. 地球物理学报, 56(9): 2971-2981, doi: 10.6038/cjg20130911.
- 刘桂萍,傅征祥. 2002. 1973年炉霍大地震( $M_s=7.6$ )最大余震( $M_s=6.3$ )的库仑破裂应力触发[J]. 中国地震, 18(2): 175-182.
- 柳畅,石耀霖,郑亮,等. 2012. 三维黏弹性数值模拟华北盆地地震空间分布与构造应力积累关系[J]. 地球物理学报, 55(12): 3942-3957.
- 缪森,朱守彪. 2013. 2013年芦山 $M_s7.0$ 地震产生的静态库仑应力变化及其对余震空间分布的影响[J]. 地震学报, 35(5): 619-631.
- 单斌,李佳航,韩立波,等. 2012. 2010年 $M_s7.1$ 级玉树地震同震库仑应力变化以及对2011年 $M_s5.2$ 级囊谦地震的影响[J]. 地球物理学报, 55(9): 3028-3042, doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.021.
- 邵志刚,傅容珊,薛霆斌,等. 2007. 以Burgers体模型模拟震后粘弹性松弛效应[J]. 大地测量与地球动力学, 27(5): 31-37.
- 邵志刚,傅容珊,薛霆斌,等. 2009. 库仑应力变化与余震对应关系的初步探讨——以集集地震为例[J]. 地球物理学进展, 24(2): 367-374.
- 沈正康,万永革,甘卫军,等. 2004. 华北地区700年来地壳应力场演化与地震的关系研究[J]. 中国地震, 20(3): 211-228.
- 石富强,朱琳,王莹,等. 2017. 九寨沟 $M_s7.0$ 地震对巴颜喀拉块体东北缘活动断裂影响的有限元模拟[J]. 中国地震, 33(4): 463-470.
- 孙荀英,刘激扬,王仁. 1994. 1976年唐山地震震时和震后变形的模拟[J]. 地球物理学报, 37(1): 45-55.
- 万永革,沈正康,刁桂苓,等. 2008a. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法及其在唐山地震序列中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3): 793-804.
- 万永革,沈正康,曾跃华,等. 2008b. 唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究[J]. 地震学报, 30(6): 581-593.
- 万永革,万永魁,靳志同,等. 2017. 用形变资料反演1976年唐山地震序列的破裂分布[J]. 地球物理学报, 60(9): 3378-3395, doi: 10.6038/cjg2017M0909.
- 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, doi: 10.6038/cjg2019M0553.
- 闻学泽,马胜利. 2006. 唐山大地震对相邻断裂段地震复发的影响[J]. 自然科学进展, 16(10): 1346-1350.
- 徐伟进,高孟潭. 2014. 中国大陆及周缘地震目录完整性统计分析[J]. 地球物理学报, 57(9): 2802-2812, doi: 10.6038/cjg20140907.
- 尤惠川,徐锡伟,吴建平,等. 2002. 唐山地震深浅构造关系研究[J]. 地震地质, 24(4): 571-582.
- 张群伟,朱守彪. 2019. 华北地区主要断裂带上的库仑应力变化及地震活动性分析[J]. 地震地质, 41(3): 649-669.
- 张素欣,边庆凯,张子广,等. 2020. 唐山断裂北段地震分布特征及其构造意义[J]. 地震研究, 43(2): 270-277.
- Broerse T, Riva R, Simons W, et al. 2015. Postseismic GRACE and GPS observations indicate a rheology contrast above and below the Sumatra slab[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120(7): 5343-5361.
- Caron L, Greff M, Fleitout L, et al. 2014. Effect of Burgers Rheology in glacial isostatic adjustment models[C]. Vienna, Austria; EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B10): 24347-24358.
- Hergert T, Heidbach O. 2011. Geomechanical model of the Marmara Sea region—II. 3-D contemporary background stress field[J]. Geophysical Journal International, 185(3): 1090-1102.
- Huang B S, Yeh Y T. 1997. The fault ruptures of the 1976 Tangshan earthquake sequence inferred from coseismic crustal deformation[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 87(4): 1046-1057.
- Huang M, Bürgmann R, Freed A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. Earth and



- Planetary Science Letters, 396(15):88–96.
- Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R. 2009. Fundamentals of rock mechanics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 90.
- King G C, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 78(3):935–953.
- Li L, Chen Q F, Cheng X, *et al.* 2007. Spatial clustering and repeating of seismic events observed along the 1976 Tangshan fault, north China [J]. Geophysical Research Letters, 34(23):229–241. <https://doi.org/10.1029/2007GL031594>.
- Parsons T, Dreger D S. 2000. Static-stress impact of the 1992 Landers earthquake sequence on nucleation and slip at the site of the 1999  $M = 7.1$  Hector Mine earthquake, southern California[J]. Geophysical Research Letters, 27(13):1949–1952.
- Rice J R, Cleary M P. 1976. Some basic stress diffusion solutions for fluid-saturated elastic porous media with compressible constituents[J]. Reviews of Geophysics, 14(2):227–241.
- Rice J R. 1992. Fault stress states, pore pressure distributions, and the weakness of the San Andreas fault[C]. International Geophysics Academic Press, 51:475–503, doi: 10.1016/S0074-6142(08)62835-1
- Robinson R, Zhou S Y. 2005. Stress Interactions within the Tangshan, China, Earthquake Sequence of 1976[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 95(6):2501–2505.
- Shen Z, Zhao C, Yin A, *et al.* 2000. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Positioning System measurements [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 105(B3):5721–5734.
- Skempton A W. 1954. The pore-pressure coefficients A and B [J]. Geotechnique, 4(4):143–147.
- Stein S, Liu M. 2009. Long aftershock sequences within continents and implications for earthquake hazard assessment[J]. Nature, 462:87–89.
- Syed Tabrez A, Freed A M, Calais E, *et al.* 2008. Coulomb stress evolution in Northeastern Caribbean over the past 250 years due to coseismic, postseismic and interseismic deformation [J]. Geophysical Journal International, 174(3):904–918.
- Wan Y, Shen Z. 2010. Static Coulomb stress changes on faults caused by the 2008  $M_w 7.9$  Wenchuan, China earthquake[J]. Tectonophysics, 491(1–4):105–118.
- Wang R, Lorenzo – Martín F, Roth F. 2006. PSGRN/PSCMP—a new code for calculating co- and post-seismic deformation, geoid and gravity changes based on the viscoelastic-gravitational dislocation theory [J]. Computers & Geosciences, 32(4):527–541.

## The Coulomb Stress Evolution after the 1976 Tangshan Strong Earthquake Swarm and Its Relationship with the 2020 Guye $M5.1$ Earthquake

ZHU Lin<sup>1</sup>, LI Tengfei<sup>2</sup>, SHI Fuqiang<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>1</sup>, SHAO Huicheng<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Earthquake Agency, Xi'an 710068, Shaanxi, China)

(2. Highway Consultants CO. Ltd., China Communications Construction Co. Ltd., Beijing 100088, China)

### Abstract

Based on the Burgers rheological model which is absorbed in the synthetic simulation of long-term tectonic deformation and short-term postseismic deformation, we simulated the co- and postseismic deformation and the related coseismic and postseismic Coulomb stress evolution that caused by the 1976 Tangshan strong earthquake swarm. Our results show that the two segments of mainshock rupture and the two strong aftershocks in Luanxian and Ninghe of 1976 Tangshan strong earthquake swarm could enhance the Coulomb stress on the rupture plane of the 2020 Guye  $M5.1$  earthquake. The temporal evolution of the lithosphere postseismic relaxation Coulomb stress show that, before and after the postseismic 15 years, the evolution state of Coulomb stress shows significant difference. Within 15 years after the Tangshan earthquake, the Coulomb stress evolution is dramatic, and while after 15 years, it is increased steady and slowly. This pattern is similar to the seismicity in the aftershock zone of Tangshan strong earthquake swarm. This may indicated that the dynamic stress adjustment in the aftershock zone of Tangshan strong earthquake swarm have been stabilization.

**Keywords:** Guye earthquake; Tangshan earthquake; Coulomb stress; Burgers rheological model