

2014年于田 $M_s 7.3$ 地震产生的静态库仑应力变化及对周边断层的影响

宋金^{1,2)} 周龙泉²⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京市民族大学南路5号 100081

2) 中国地震台网中心, 北京市西城区三里河南横街5号 100045

摘要 计算了2008年以来于田地区4次 $M_s 5.5$ 以上地震产生的同震静态库仑破裂应力场变化, 分析它们之间的应力触发效应、4次地震产生的应力变化与余震分布的关系及其对周边主要断层的影响。结果表明, 2011年 $M_s 5.5$ 、2014年 $M_s 7.3$ 地震均处于之前地震产生的库仑破裂应力增加区, 增加值分别为0.004、0.021 MPa, 说明这两次地震明显受到之前强震触发作用的影响; 而2012年 $M_s 6.2$ 地震位于之前地震产生的应力影区内, 对其发生有延缓作用。此次 $M_s 7.3$ 地震产生的库仑破裂应力场图像与目前余震空间分布特征较为吻合; 但主震破裂面上部分应力增强区几乎没有余震发生, 这些地区未来存在发生强余震的可能。距此次震中最近的贡嘎错断裂中段上不同断层段库仑应力扰动值变化很大, 计算结果可能会受有限断层震源模型的一定影响, 依然存在较强的地震危险性。此外, 贡嘎错断裂东北段、普鲁断裂中西段及龙木错-邦达错断裂带西段受2008年以来地震的累积库仑应力增加的影响也较为明显, 其应力扰动最大值均超过0.002 MPa, 同样存在一定地震危险性。

关键词: 于田地震 库仑应力变化 余震分布 断层相互作用

[文章编号] 1001-4683(2014)02-0168-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定, 2014年2月12日17时19分, 新疆于田发生 $M_s 7.3$ 强震, 震中位置为 36.1°N 、 82.5°E , 震源深度12 km。地震震中位于西昆仑块体与昆仑-柴达木-祁连块体之间的阿尔金断裂西南端 NE 向张剪切段邻近区域(徐锡伟等, 2011; Xu et al, 2013), 也是阿尔金断裂、康西瓦断裂等的交汇部位。该区域地震活动十分活跃, 2008年3月21日在本次地震震中西南方向约100 km处就曾发生过 $M_s 7.3$ 地震, 周边地区2011年和2012年分别发生了 $M_s 5.5$ 、 $M_s 6.2$ 地震(图1)。截至3月12日11时42分, 于田7.3地震共记录到 $M_L 1.0$ 以上余震4000多次, 其中 $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震1次, $M_s 4.0 \sim 4.9$ 地震12次。目前余震活动依然持续, 有效判定未来强余震发生位置、圈定震区周边未来可能地震活动的范围对灾

[收稿日期] 2014-03-05; [修定日期] 2014-03-18

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划青年项目(XH14055Y)、国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-01)共同资助

[作者简介] 宋金, 女, 1986年生, 助理研究员, 主要从事地震学方面研究。Email: songjinbent@163.com

后重建和次生灾害防御具有重要参考意义。

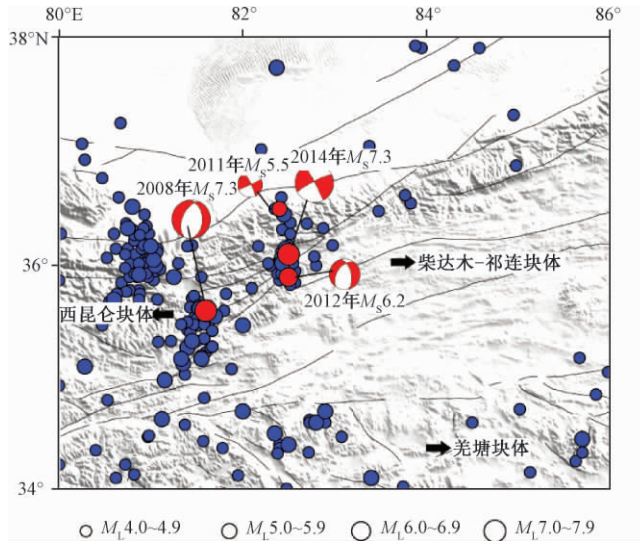


图1 于田 $M_s7.3$ 地震及其周边地区构造环境

红色沙滩球为2008年 $M_s7.3$ 地震、2011年 $M_s5.5$ 地震、2012年 $M_s6.2$ 地震和2014年 $M_s7.3$ 地震的震源机制解;蓝色圆圈为1970年该地区 $M_L4.0$ 以上地震空间分布;灰色线段为断层

大量研究表明大地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震发生位置和时间有较大影响 (Harris, 1998; Stein, 1999; Das et al, 1981; Deng et al, 1999; 周龙泉等, 2008; 华卫等, 2009; 宋金等, 2011; 单斌等, 2012、2013; 缪森等, 2013)。King 等 (1994) 计算了兰德斯特地震在最优化破裂方向上产生的库仑破裂应力变化图像, 发现其与兰德斯特地震的余震活动空间分布特征吻合较好; Lin 等 (2004) 对圣安德列斯断裂带南部逆冲-走滑断层与逆断层地震产生的库仑破裂应力变化进行了计算, 结果显示与余震活动空间分布较为一致; 刘桂萍等 (2000) 通过对比唐山 7.8 级地震后区域静应力场的变化和震前区域地震活动的变化, 发现主震周围 3 个地震活动增强区域可能受到唐山地震的触发。大地震引起的库仑破裂应力变化除了可以有效解释余震空间分布特征之外, 许多研究也表明库仑破裂应力变化也可用于解释强震间的相互作用。韩竹军等 (2008) 分析了南北地震带北部 5 次 $M \geq 7$ 级地震之间的相互触发影响, 发现下一次地震均发生在之前地震产生的应力触发区。朱航等 (2009) 的研究表明汶川地震的发生与松潘 1973、1976 年两组地震有密切关系。张竹琪等 (2008) 的计算结果显示 1997 年新疆伽师震群中的地震均对后续地震产生明显的应力触发作用, 该地区正断层活动促进了雁形走滑断层间地震的循环触发。万永革等 (2010) 计算了 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震对周边断层的应力扰动。2014 年 2 月 12 日于田再次发生 $M_s7.3$ 地震, 针对本次地震是否受到 2008 年、2011 年及 2012 年周边 3 次地震的触发作用以及本次地震发生后对周边主要断层会产生怎样的应力扰动影响进行分析研究, 将有助于提高对于强震活动机理及未来地震危险性的认识。

本文运用已发布的有限断层模型, 通过计算 2014 年于田 7.3 级地震附近地区 2008 年以来强震产生的同震静态库仑破裂应力变化来分析周边强震对本次地震的触发效应; 同时

计算本次地震产生的应力变化对后续余震的触发作用;并通过计算周围断层的加卸载情况,为该区未来的地震危险性判定提供依据。

1 静态库仑应力变化

所谓地震“应力触发”,是指前期发生的地震在研究区产生的应力变化对研究区未来地震活动产生的促进或抑制作用(Harris, 1998)。具体计算方法为将前期地震产生的应力变化张量投影到关注的断层面和滑动方向上,考虑正应力、孔隙压力和摩擦系数的影响,得到库仑破裂应力变化 ΔCFS 。若库仑破裂应力变化为正,之前地震产生的应力变化会促使目标断层运动,即地震可能被触发,地震危险增大;反之,负的库仑破裂应力变化则会抑制断层运动,发生地震的可能性降低(Harris, 1998; King et al, 1994)。

依据库仑破裂准则,当断层面剪切应力达到摩擦强度时,断层面将发生剪切破坏。库仑破裂应力变化 ΔCFS 定义为(Harris, 1998; Stein et al, 1992)

$$\Delta CFS = \Delta\tau_s + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p) \quad (1)$$

式中 μ 为摩擦系数; $\Delta\tau_s$ 和 $\Delta\sigma_n$ 分别为断面上的剪切应力和正应力; $\Delta\tau_s$ 沿滑动方向为正; $\Delta\sigma_n$ 则定义为张开为正; Δp 为孔隙流体压力变化。孔隙压力减少摩擦系数的效应可用 $\mu' = \mu(1 - B)$ 表示。其中, B 为Skempton系数,数值范围为0~1(Rice, 1992)。因此,式(1)变为

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

当 $\Delta CFS > 0$ 时,则该应力变化有利于后续地震的发生;否则,不利于其发生。

2 计算过程与结果

2.1 2008年 $M_s7.3$ 、2011年 $M_s5.5$ 、2012年 $M_s6.2$ 和2014年 $M_s7.3$ 地震间的触发影响

2008年以来于田地区曾发生过4次 $M_s5.5$ 以上地震,分别为 $M_s7.3$ 、 $M_s5.5$ 、 $M_s6.2$ 地震以及2014年2月12日 $M_s7.3$ 地震。下面依次计算这些地震的库仑破裂应力扰动值,讨论上述地震事件之间的相互作用关系。

计算过程中,2008年于田 $M_s7.3$ 地震采用Ji Chen^①给出的有限断层模型反演结果计算库仑破裂应力变化,该模型由 14×5 个滑移单元组成。2014年 $M_s7.3$ 地震采用张勇等(2014)给出的有限断层模型反演结果计算库仑破裂应力变化,该模型由 17×9 个滑移单元组成。由于缺少有限断层模型资料,2011年 $M_s5.5$ 、2012年 $M_s6.2$ 地震均采用哈佛大学矩心矩张量解作为输入参数。根据周边实际断层及其余震空间分布情况,认为这两次地震断层面参数分别为:走向 245° 、倾角 89° 、滑动角 -8° 和走向 215° 、倾角 47° 、滑动角 -52° ;其破裂长度 L 和宽度 W 根据Wells等(1994)的统计公式得到

$$L = \begin{cases} 10^{(-2.57+0.62M_w)} & \text{走滑断层} \\ 10^{(-2.42+0.58M_w)} & \text{逆断层} \\ 10^{(-1.88+0.50M_w)} & \text{正断层} \end{cases} \quad (3)$$

① http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/home.html

$$W = \begin{cases} 10^{(-0.76+0.27M_w)} & \text{走滑断层} \\ 10^{(-1.61+0.41M_w)} & \text{逆断层} \\ 10^{(-1.14+0.35M_w)} & \text{正断层} \end{cases} \quad (4)$$

利用 Coulomb 3.3 (Toda et al, 2005; Lin et al, 2004) 计算地震在空间上产生的库仑破裂应力变化。物性参数方面, 参照 King 等 (1994) 的方法, 有效摩擦系数取 0.4。图 2 (a) 为 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震产生的库仑破裂应力在 2011 年 $M_s5.5$ 地震断层面上的投影, 结果显示 $M_s5.5$ 地震位于应力加载区, 震中位置库仑破裂应力增加量达 0.004MPa, 但小于通常被认为能够有效促进后续大地震发生的阈值 0.01MPa (Harris et al, 1998)。图 2 (b) 为 2008 年 $M_s7.3$ 、2011 年 $M_s5.5$ 地震产生的累积静态库仑应力在 2012 年 $M_s6.2$ 地震断层面上的投影, 结果显示 $M_s6.2$ 地震位于应力影区, 应力卸载 0.007MPa; 也就是说 2008 年以来两次于田地震的发生对 $M_s6.2$ 地震的发生起延缓作用。图 2 (c) 显示了 2008 年以来于田地区 3 次较强地震在 2014 年 $M_s7.3$ 地震断层面上的应力扰动累加结果, 从图 2 (c) 中可以明显看出, 2014 年 $M_s7.3$ 地震震中恰好位于 3 次地震产生的应力加载区内, 震中区同震库仑应力增加 0.021MPa。因此, 2008 年以来的 3 次地震对本次地震存在明显触发作用。

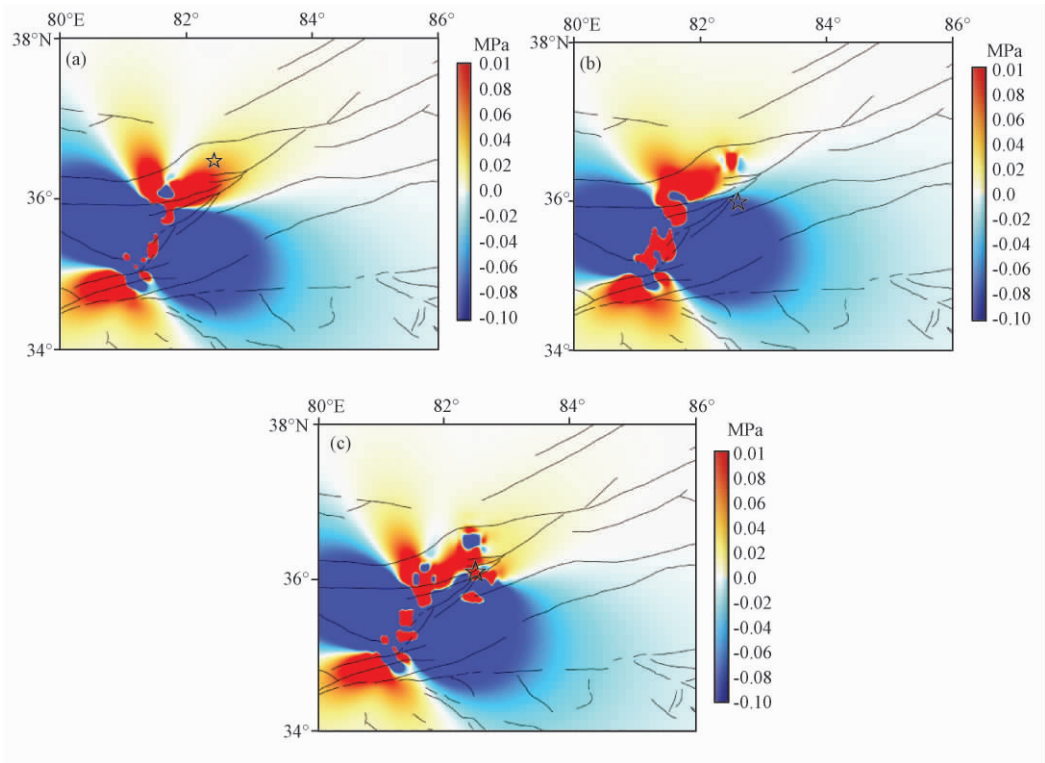


图 2 于田 2008 年以来发生地震对后续地震的应力扰动影响

☆代表后续地震震中位置

(a) 2008 年 $M_s7.3$ 地震产生的库仑破裂应力在 2011 年 $M_s5.5$ 地震断层面上的投影; (b) 2008 年 $M_s7.3$ 地震与 2011 年 $M_s5.5$ 地震产生的累积应力在 2012 年 $M_s6.2$ 地震断层面上的投影; (c) 2008 年以来 3 次地震产生的累积应力在 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震断层面上的投影

2.2 2014 年于田 7.3 级地震对其余震活动的触发影响

根据于田 $M_S 7.3$ 地震反演模型(张勇等,2014)计算了同震静态库仑破裂应力场变化,结果如图 3 所示。物性参数同前述,接收断层参数选取 GCMT 提供的此次于田地震主震震源机制解节面 I(走向 242° 、倾角 82° 、滑动角 -4°)。余震目录来源于新疆维吾尔自治区地震局。从图 3 中可以看出,本次主震产生的库仑破裂应力变化结果显示主震破裂面附近、两端及其 NW、SE 两个方向均为明显的库仑破裂应力增加区,目前记录到的 $M_L \geq 3.0$ 余震中有 83% 分布在破裂面附近的应力增强区内,只有少数余震发生在应力下降的影区,说明库仑破裂应力场变化较好地解释了余震的发生。然而主震破裂面上的部分应力增强区依然没有余震发生,且余震空间分布存在一定空段,这些地区未来发生较强余震的可能性较大,需要密切关注。

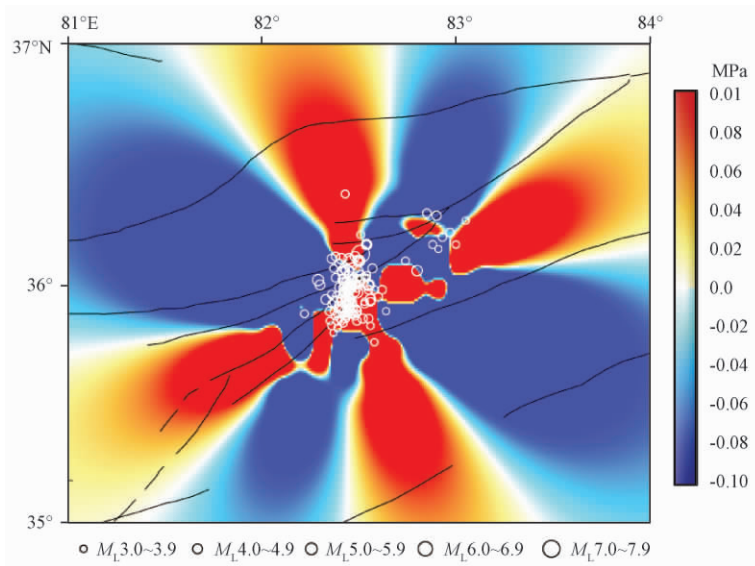


图 3 于田 $M_S 7.3$ 地震产生的库仑破裂应力变化(计算深度 10km)与余震($M_L \geq 3.0$)活动空间分布

2.3 2014 年于田 7.3 级地震对周边断层的影响

前人的研究表明静态库仑应力能够在一定程度上解释强震间的触发作用(Toda et al,2008;Nalbant et al,2010),而且前述 2.1 也显示 2011 年 $M_S 5.5$ 地震和本次 $M_S 7.3$ 地震均发生在之前地震产生的库仑破裂应力加载区内。由于此次地震的发生同样会对周围断层产生应力扰动影响,因此本文计算了震中附近区域几条主要断层(邓起东等,2002;沈正康等,2003;万永革等,2010;王凡等,2011)的库仑破裂应力变化,具体参数如表 1 所示,物性参数同前述。

图 4(a)给出了 2014 年于田 $M_S 7.3$ 地震主震在周边地区主要活动断层上产生的应力扰动。由图 4(a)可以看到,距离本次地震震中最近的贡嘎错断裂中段上不同断层段的库仑破裂应力扰动值变化很大,有的断层库仑破裂应力变化值高达 0.140MPa ;有的则明显受到应力卸载作用的影响,库仑应力变化值为 -0.336MPa 。该计算结果一定程度上可能会受震源

表 1 研究区内主要活动断裂的库仑应力变化

断层名称	标记	倾角 ($^{\circ}$)	滑动角 ($^{\circ}$)	2014 年于田 $M_s7.3$ 地震		2008 年以来于田地区 $M_s5.5$ 以上强震	
				最大 ΔCFS (MPa)	最小 ΔCFS (MPa)	最大 ΔCFS (MPa)	最小 ΔCFS (MPa)
康西瓦断裂中段	KXC	90	0	0.00544	0.00038	0.04246	-0.07604
康西瓦断裂东段	KXE	90	0	0.03888	-0.09912	0.05639	-0.12258
贡嘎错断裂西南段	GGW	75	-30	0.01994	0.00266	0.20650	-0.28302
贡嘎错断裂中段	GGC	75	-30	0.14004	-0.33625	0.18010	-0.35883
贡嘎错断裂东北段	GGN	75	-30	0.00104	-0.01980	0.00193	-0.01807
普鲁断裂西段	PLW	45	90	0.00013	0.00003	0.00376	0.00077
普鲁断裂中段	PLC	45	90	0.00576	-0.00192	0.00423	-0.00167
普鲁断裂东段	PLE	45	90	0.00020	-0.00879	0.00024	-0.00910
阿尔金断裂带	ATF	75	10	0.00036	0.00013	0.00091	0.00025
龙木错-邦达错断裂西段	LBW	90	0	0.00005	-0.00116	0.00788	0.00167
龙木错-邦达错断裂东段	LBE	90	0	0.00542	-0.00266	-0.00085	-0.02149

有限断层模型的影响,但值得关注的是该断裂段受到较强应力扰动的影响,可能存在较大的地震危险性。康西瓦断裂东段少部分断层段也受到较强应力加载作用,加载应力变化达 0.04MPa。本次 7.3 级地震主震对距离较近的贡嘎错断裂西南段、普鲁断裂中段及康西瓦断裂中段产生的库仑破裂应力增加也十分明显,它们的应力增加范围分别为 0.0030 ~ 0.0200、0.0004 ~ 0.0060、0.0003 ~ 0.0050MPa。龙木错-邦达错断裂东段部分断层段和贡嘎错断裂东北段部分断层段也受到一定的应力扰动影响,库仑应力分别上升了 0.005、0.001MPa。而康西瓦断裂东段大部分断层段和普鲁断裂东段主要呈卸载趋势,库仑破裂应力变化为 -0.0001 ~ -0.1000MPa 和 -0.001 ~ -0.009MPa。可以看出,2014 年于田 7.3 级地震主震仅对周围距离其约 100km 范围内的断层产生明显的加卸载作用,距离较远的东北方向的阿尔金断裂带、西边的普鲁断裂西段库仑破裂应力波动较小,扰动值最大分别为 0.0004、0.0001MPa。

考虑到 2008 年以来研究区域已发生 4 次 $M_s5.5$ 以上地震且万永革等 (2010) 仅给出了 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震对周边断层的应力扰动结果,因此本文计算了这 4 次地震对周边断层的应力扰动累积结果(图 4(b))。图 4(b) 显示,贡嘎错断裂中段应力扰动值仍然最为明显,需要密切关注其周边的地震活动。此外,贡嘎错断裂东北段、阿尔金断裂及普鲁断裂西段上库仑应力增加更为明显,其应力扰动最大值分别达到 0.002、0.001、0.004MPa,这些断层的地震危险性进一步增加。位于研究区域南段的龙木错-邦达错断裂带西段受到应力加载的影响,应力扰动最大值达 0.008MPa。而之前处于 2014 年于田 $M_s7.3$ 地震加载作用下的贡嘎错断裂西南段、康西瓦断裂中段和龙木错-邦达错断裂带东段在 2008 年以来 4 次地震的库仑破裂应力累积影响下明显处于卸载阶段,这主要源于 2008 年 7.3 级地震对它们产生的较强卸载影响。

3 讨论与结论

基于静态库仑破裂应力触发原理,本文计算了 2008 年以来于田 4 次 $M_s5.5$ 以上地震产生的同震应力场变化,分析它们相互间的应力触发影响、其应力场变化对余震分布及周边主

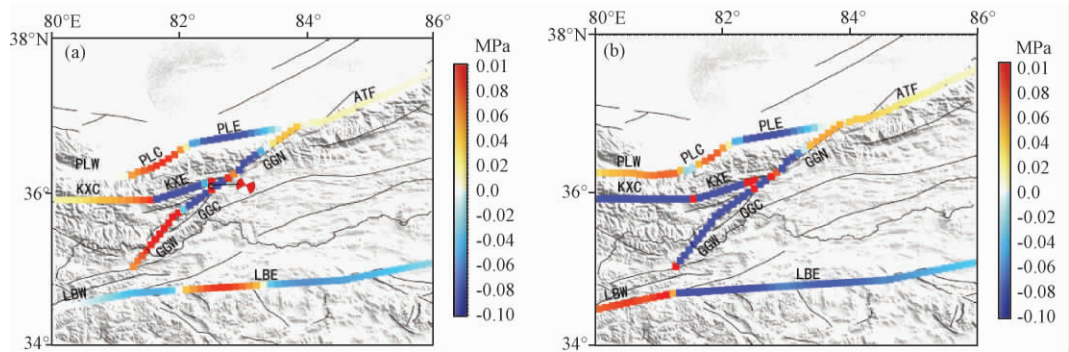


图4 研究区内主要活动断层库仑破裂应力变化

(a) 2014年 $M_s7.3$ 地震对主要活动断层产生的应力扰动影响;

(b) 2008年以来4次 $M_s5.5$ 以上地震对主要活动断层的应力扰动累积影响

断层标记 PLW 代表普鲁断裂西段; PLC 代表普鲁断裂中段; PLE 代表普鲁断裂东段; ATF 代表阿尔金断裂带; KXC 代表康西瓦断裂中段; KXE 代表康西瓦断裂东段; GGN 代表贡嘎错断裂西南段; GGC 代表贡嘎错断裂中段; GGB 代表贡嘎错断裂东北段; LBW 代表龙木错-邦达错断裂西段; LBE 代表龙木错-邦达错断裂东段

要断层的影响,得到以下结论:

(1) 2011年 $M_s5.5$ 、2014年 $M_s7.3$ 地震均处于之前地震产生的应力加载区,尤其是2014年 $M_s7.3$ 地震震中区的库仑应力增量达0.021MPa,说明2008年以来3次地震对2014年于田 $M_s7.3$ 地震存在明显触发作用。2012年 $M_s6.2$ 地震位于之前地震产生的应力影区内,本文中参与计算的地震活动对其发生有延缓作用。需要说明的是,大地震的真实破裂过程十分复杂,有限断层反演结果仅是对真实情况的一种简化,基于其计算得到的近场库仑破裂应力变化结果可能会受到一定影响,所以2012年 $M_s6.2$ 地震是否受到之前地震的触发作用,还需进一步深入研究。

(2) 2014年于田 $M_s7.3$ 地震产生的库仑破裂应力图像能够较好地解释目前余震的分布。然而主震破裂面上的部分应力增强区依然没有余震发生,且余震空间分布存在一定空段,这些地区未来发生较强余震的可能性较大,需要密切关注。

(3) 距离本次地震震中最近的贡嘎错断裂中段上不同断层段落的库仑破裂应力扰动值变化很大,虽然计算结果在一定程度上可能会受所采用的震源有限断层模型的影响,但值得关注的是该断裂段受到很强的应力扰动影响,该断裂带依然存在较大的地震危险性。此外,贡嘎错断裂东北段、普鲁断裂中西段及龙木错-邦达错断裂带西段受2008年以来地震的影响,累积库仑应力增加也较为明显,其应力扰动最大值均大于0.002MPa,同样存在一定的地震危险性,需要密切关注其周边的地震活动。

(4) 本文中对地震产生的库仑破裂应力变化的近似估算采用了比较简单的弹性半空间模型,实际上地球介质的三维不均匀结构会对计算结果产生一定影响;同时,关于地球粘弹性松弛效应对应力扰动产生的影响,万永革等(2010)认为对描述发震时间间隔较短的地震相互间的触发影响,这种效应可以忽略不计;而Freed等(2001)和Zeng(2001)的研究则显示采用粘弹模型计算得到的兰德斯地震7年粘滞松弛效应导致赫克托矿(Hector Mine)地震震源区的震后库仑破裂应力增加了0.1~0.2MPa;Nalbante等(2010)的结果表明汶川地

震由于粘弹性松弛效应作用对芦山地震的震源附近产生持续加载,但这种加载变化极为缓慢,5 年内的变化值为 0.003MPa 。本文中 2008 年 $M_s7.3$ 级地震与本次 7.3 级地震间隔近 6 年时间,类比分析认为粘弹效应可能会对文中结果产生一定影响,但对距离较近的几个断裂带应力扰动的结果影响不大。此外,大量余震活动也会对区域应力变化产生影响(万永革等,2005),2008 年于田 7.3 级地震的余震活动会产生多大的应力扰动,可能需要在未来的研究中结合大量余震数据进行更为准确而详细的计算。

致谢:刘桂萍研究员、刘杰研究员、蒋海昆研究员和张永仙研究员对本文进行了详细的指导,作者谨表谢意。

参考文献

- 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,地球物理学报, **55** (9), 3028 ~ 3042。
- 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,中国科学 D 辑:地球科学, **43** (6), 1002 ~ 1009。
- 邓起东、张培震、冉勇康等,2002,中国活动构造基本特征,中国科学 D 辑:地球科学, **32** (12), 1020 ~ 1030。
- 韩竹军、董绍鹏、谢富仁等,2008,南北地震带北部 5 次(1561 ~ 1920 年) $M \geq 7$ 级地震触发关系研究,地球物理学报, **51** (6), 1776 ~ 1784。
- 华卫、陈章立、李志雄等,2009,汶川 8.0 级地震触发与余震活动空间分布研究,地震, **29** (1), 33 ~ 39。
- 刘桂萍、傅征祥,2000,1976 年 7 月 28 日唐山 7.8 级地震触发的区域地震活动和静应力场变化,地震学报, **22** (5), 17 ~ 26。
- 缪淼、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,地震学报, **35** (5), 619 ~ 631。
- 沈正康、王敏、甘卫军等,2003,中国大陆现今构造应变率场及其动力学成因研究,地学前缘, **10** (增刊), 93 ~ 100。
- 宋金、蒋海昆,2011,2010 年 4 月 14 日玉树 $M_s7.1$ 地震对余震的触发研究,中国地震, **27** (4), 396 ~ 402。
- 万永革、沈正康、兰从欣,2005,兰德斯地震断面及其附近余震产生的位移场研究,地震学报, **27** (2), 139 ~ 146。
- 万永革、沈正康、盛书中等,2010,2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释,地球物理学报, **53** (2), 280 ~ 289。
- 王凡、陈为涛、王敏等,2011,利用 GPS 观测资料分析 2008 年于田 $M_s7.3$ 地震的同震位移及震后形变,地球物理学报, **54** (9), 2250 ~ 2255。
- 徐锡伟、谭锡斌、吴国栋等,2011,2008 年于田 $M_s7.3$ 地震地表破裂带特征及其构造属性讨论,地震地质, **33** (2), 462 ~ 471。
- 张竹琪、陈永顺、林间,2008,1997 年伽师震群中相邻正断层和走滑断层之间相互应力作用,中国科学 D 辑(地球科学), **38** (3), 334 ~ 342。
- 周龙泉、马宏生、夏红等,2008,2007 年苏门答腊 8.5 级、8.3 级地震强余震库仑破裂应力触发研究,地震, **28** (1), 40 ~ 46。
- 朱航、闻学泽,2009,1973 ~ 1976 年四川松潘强震序列的应力触发过程,地球物理学报, **52** (4), 994 ~ 1003。
- 张勇、许力生、陈运泰等,2014,2014 年 2 月 12 日于田 $M_w6.9$ 地震破裂过程初步反演:兼论震源机制对地震破裂过程反演的影响,地震学报, **36** (2), 159 ~ 164。
- Das S, Scholz C, 1981, Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase, Bull Seism Soc Am, **71**, 1669 ~ 1675。
- Deng J S, Hudnut K, Gurnis M, et al, 1999, Stress loading from viscous flow in the lower crust and triggering of aftershocks following the 1994 Northridge, California, Earthquake, Geophys Res Lett, **26** (21), 3209 ~ 3212。
- Freed A M, Lin J, 2001, Delayed triggering of the 1999 Hector Mine earthquakes by viscoelastic stress transfer, Nature, **411** (6834), 180 ~ 183。

- Harris R A, 1998, Introduction to special section: Stress triggers, Stress shadows, and implications for seismic hazard, *J Geophys Res*, **103**, 24347 ~ 24358.
- King G C P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, *Bull Seism Soc Am*, **84**, 935 ~ 953.
- 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 Geophys Res*, **109**, B02303.
- Nalbant S S, McCloskey J, 2010, Stress evolution before and after the 2008 Wenchuan, China earthquake, *Earth Planet Sci Lett*, **307** (1/2), 222 ~ 232.
- Rice J R, 1992, Fault stress states, pore pressure distribution, and the weakness of the San Andreas fault, In: Evans B, Wong T F eds, *Fault mechanics and transport properties of rock*, 475 ~ 503, London: Academic Press.
- Stein R S, 1999, The role of stress transfer in earthquake occurrence, *Nature*, **402**, 605 ~ 609.
- Stein R S, King G C P, Lin J, 1992, Change in failure stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude = 7.4 Landers earthquake, *Science*, **258**, 1328 ~ 1332.
- 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, *Geophys Res Lett*, **35** (17), L17305.
- Toda S, Stein R S, Richards-Dinger K, et al, 2005, Forecasting the evolution of seismicity in southern California: Animations built on earthquake stress transfer, *J Geophys Res*, **111**, B05S16, doi:10.1029/2004JB003415, 2005.
- Wells D L, Coppersmith K J, 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull Seism Soc Am*, **84** (4), 974 ~ 1002.
- Xu X W, Tan X B, Yu G H, et al, 2013, Normal and oblique-slip of the 2008 Yutian earthquake: Evidence for eastward block motion, northern Tibetan Plateau, *Tectonophysics*, **584**, 152 ~ 165.
- Zeng Y H, 2001, Viscoelastic stress-triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by the 1992 Landers earthquake, *Geophys Res Lett*, **28** (15), 3007 ~ 3010.

The static stress triggering effects related with the Yutian $M_s7.3$ earthquake

Song Jin^{1,2)} Zhou Longquan²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract This paper calculates the static coulomb stress changes generated by 4 earthquakes in the Yutian area during 2008 ~ 2014 separately, then discusses triggering influence among them, their accumulated coulomb stress changes and their influence on nearby faults. The results indicate that the $M_s5.5$ earthquake in 2011 and the $M_s7.3$ earthquake in 2014 are both in the regions where the coulomb stress change is positive, the stress changes are 0.004MPa and 0.021MPa respectively. It means they were triggered by the prior earthquakes. The $M_s6.2$ earthquake in 2012 occurred in the place where the coulomb stress change is negative. It is postponed by the prior earthquakes. The coulomb stress change image of the $M_s7.3$ earthquake in 2014 is in accord with aftershocks ($M_L \geq 3.0$) distribution, but some regions on the fault where the coulomb stress change is positive have few aftershocks. Strong aftershocks may occur at these districts in future. In addition, this paper calculates the coulomb stress change on faults nearby, and finds that the coulomb stress changes of different elements in GGC fault are very different. It must get strong triggered-influence though the result may be influenced by the input finite fault model, so it still has a large earthquake-risk. The GGN, PLC, PLW and LBW faults are also triggered by the 4 earthquakes occurred during 2008 ~ 2014, their maximum of coulomb stress change all exceed 0.002MPa, so they also have strong earthquake-hazard.

Key words: The Yutian earthquake Coulomb stress change Aftershock distribution
Fault interaction