

宋金、蒋海昆 2011 年 4 月 14 日玉树 $M_S 7.1$ 地震对余震的触发研究, 中国地震 27(4) 396 ~ 402。

2010 年 4 月 14 日玉树 $M_S 7.1$ 地震 对余震的触发研究

宋金 蒋海昆

中国地震台网中心, 北京西城区三里河南横街 5 号 100045

摘要 研究了 2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震产生的静态库仑破裂应力变化对余震及区域地震活动空间分布的影响。在考虑震源区附近区域构造应力场的基础上, 由震源区构造应力和主震破裂产生的应力叠加, 计算得到最容易破裂的余震断面, 进而计算玉树主震在上述余震断层面上产生的库仑破裂静态应力变化。结果表明, 库仑应力变化图像与余震分布较为吻合, 说明玉树主震对大部分余震有触发作用。利用相同方法计算了玉树主震对周边更大范围内地震的应力触发影响, 发现大部分区域地震活动空间分布与库仑应力变化图像基本一致, 中小地震大多发生在正向触发区域, 但量值较小。对余震断面与主震完全一致的情形进行了同样的计算, 与前述方法计算结果的对比显示, 考虑区域应力场的计算方式所得库仑破裂应力变化图像, 能够更好地与余震及区域中小地震空间分布图像相吻合。

关键词: 玉树 7.1 级地震 库仑应力变化 余震分布 区域应力场

[文章编号] 1001-4683(2011)04-0396-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

据中国地震台网测定, 2010 年 4 月 14 日 7 时 49 分 37 秒, 青海玉树发生 $M_S 7.1$ 地震, 震中位置为 33.2°N 、 96.6°E , 震源深度 14km, 震中位于玉树结古镇西北约 30km 处。玉树地震造成 2220 人死亡, 70 人失踪, 1 万多人受伤, 大量房屋倒塌。玉树地震发生于巴彦喀拉地块南缘的甘孜-玉树断裂带, 该断裂沿 NW-SE 方向展布, 以左旋走滑为主。甘孜-玉树断裂带第四纪以来平均水平滑动速率较高, 约 $5 \sim 7\text{mm/a}$, 地震活动性较强(周荣军等, 1997; 李闽峰等, 1995; 闻学泽等, 2003)。玉树地震后余震活跃, 截至 2010 年 7 月 8 日, 共发生余震 2510 多次, 其中 6.0 ~ 6.9 级 1 次, 5.0 ~ 5.9 级 3 次, 2.0 ~ 4.9 级 541 次, 余震分布尺度约 150km。

大地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震发生的位置和时间有较大影响(Harris, 1998; Stein, 1999)。就余震分布而言, Das 等(1981)发现 Borrego 山脉地震、Homestead 山谷地震的余震活动均与主震产生的剪切应力场吻合较好; King 等(1994)计算了 Landers 地震

[收稿日期] 2011-05-24

[项目类别] 国家科技支撑计划项目“水库地震预测方法研究(2008BAC38B03)”01 专题、中国地震台网中心青年基金(302-5424)共同资助

[作者简介] 宋金, 女, 1986 年生, 研究实习员, 主要从事地震学和地震预测方面的研究。E-mail: songjinbent@163.com
蒋海昆, 通讯作者。E-mail: jianghaikun@sohu.com

在最易破裂断层面 (optimally orientated fault) 上产生的库仑应力变化图像, 发现其与 Landers 地震的余震活动有较好的对应关系; Lin 等 (2004) 对圣安德列斯南部逆断层与逆冲-走滑断层产生的库仑应力变化进行了计算, 发现与余震活动空间分布吻合较好; 刘桂萍等 (2000) 通过研究震后区域静应力场的变化和唐山地震前后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, 认为这些地震可能由唐山地震触发; 万永革等 (2008) 利用粘弹性模型计算了唐山地震、滦县地震和宁河地震产生的累积库仑应力变化, 发现 95% 的余震分布在库仑破裂应力变化增加的区域。就区域地震活动而言, Reasenber 等 (1992) 计算了 1989 年加州 Loma Prieta 地震产生的库仑应力变化, 与区域地震活动对比发现, 大多数地震活动速率增大区的库仑应力变化为正; Toda 等 (2005) 计算了 California 地区 1986 ~ 2003 年间地震产生的库仑应力变化, 认为背景地震活动速率较高的地区, 库仑应力的变化能够较好地指示地震活动速率的变化; 国内韩竹军等 (2008) 分析了南北地震带北部 5 次 $M \geq 7$ 地震之间的相互触发关系, 发现下一次地震无一例外地发生在前面地震产生的应力触发区。

在以往研究的基础上, 本文结合地震震源区构造应力场, 计算了玉树 $M_s 7.1$ 主震在其周边地区空间上产生的库仑破裂静应力变化, 进而讨论地震触发与余震及周边地震空间分布之间可能存在的关系。此项工作的意义在于对库仑应力触发方法在我国地区进一步的验证研究, 同时试图找出玉树地震对周边地区的影响, 为区域危险性分析提供一定的参考依据。

1 静态库仑破裂应力计算

所谓地震“应力触发”, 是指前期发生的地震在研究区内产生的应力变化对研究区未来地震活动的促进或抑制作用 (Harris, 1998)。具体计算方法一般是将前期地震产生的应力变化张量投影到研究区所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 。若库仑应力变化为正, 此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, 地震危险性增大; 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)。

应用库仑破裂准则, 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。定义库仑破裂应力变化 ΔCFS 为 (Harris, 1998; Stein et al, 1992)

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

其中 μ 为摩擦系数, $\Delta \tau_s$ 和 $\Delta \sigma_n$ 分别为断面上的剪切应力变化和正应力变化, $\Delta \tau_s$ 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, 范围为 0 ~ 1 (Rice, 1992)。因此, 式 (1) 变为

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

如果 $\Delta CFS > 0$, 则该应力变化有利于后续地震发生; 否则, 不利于地震的发生。

为求解玉树主震库仑应力变化对后续发生余震的可能影响, 需要知道余震可能的破裂面。由于无法得到所有余震真实的破裂面资料, 本文采用将震源区构造应力与主震产生的应力叠加得到最易破裂余震断层面的方法来进行粗略估计 (King et al, 1994)。具体做法是: 首先根据 Okada (1992) 给出的解析方法求得主震破裂产生的应力张量, 将其与震源处的

构造应力叠加,求出空间各点的震后应力场,找到最大剪切力的 2 个节面,选择滑动矢量与主震滑动矢量夹角最小的节面作为余震破裂面,将地震产生的应力张量投影到该破裂面和滑动方向上,从而得到库仑破裂应力变化。

根据甘孜-玉树断裂带所处的大尺度动力环境,并参考许忠淮等(1987)的结果,该区域最大主应力方向为 N34°E,倾角为 0°;最小主应力方向为 N56°W,倾角为 0°。

当有效正应力在 3.0MPa ~ 1.7GPa,范围内时,岩石摩擦强度(frictional resistance)由 Byerlee 定律表达(Byerlee,1968)

$$\begin{aligned} \tau &= 0.85\bar{\sigma}_n & \bar{\sigma}_n < 200\text{MPa} \\ \tau &= 60 \pm 10 + 0.6\bar{\sigma}_n & \bar{\sigma}_n \geq 200\text{MPa} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $\bar{\sigma}_n$, τ 分别为破裂发生时,破裂面上的有效正应力及剪应力。当裂隙岩石在其裂隙面上满足公式(3)时,岩石将产生错动。

基于 Byerlee 定律,Jaeger 等(1976)提出最大和最小有效应力间的计算公式

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_1 &\approx 5\bar{\sigma}_3 & \bar{\sigma}_3 < 110\text{MPa} \\ \bar{\sigma}_1 &\approx 3.1\bar{\sigma}_3 + 210 & \bar{\sigma}_3 \geq 110\text{MPa} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_3$ 分别为第 1、3 有效主应力。

在 Byerlee 定律基础上,Brace 等(1980)给出随深度的变化 $\sigma_H - \sigma_V$ 较合理的取值范围,0 ~ 50km 范围内的结果如图 1 所示。其中深度 10km 处,在假设静态孔隙压 $p_p = 0.42\sigma_V$ 的情况下, $\sigma_H - \sigma_V$ 的最小值和最大值分别为 -100MPa、500MPa。考虑到震源区大多数断裂均为走滑型(邓起东等,2002)和许忠淮等(1987)给出的区域应力场结果,本文令 $\sigma_2 = \sigma_V$, σ_1 、 σ_3 取值均在 σ_H 的合理值范围内。假定地下物质平均密度为 2.7g/cm²,则地下 10km 深处垂向应力 $\sigma_V = \rho gh = 265\text{MPa}$,区域最大和最小主应力 σ_1 、 σ_3 合理的取值范围介于 165 ~ 765MPa 之间。假定 $\sigma_3 = 200\text{MPa}$,则 $\bar{\sigma}_3 = \sigma_3 - p_p = 88.7\text{MPa}$,代入公式(4)中可得 $\bar{\sigma}_1 = 5\bar{\sigma}_3 = 443.5\text{MPa}$;进而求得 $\sigma_1 = \bar{\sigma}_1 + p_p = 554.8\text{MPa}$ 。计算结果表明,在上述合理值范围内取值的变化对结果影响不明显,因此图 2 ~ 4 中 σ_1 、 σ_3 取值均为 555MPa 和 200MPa。

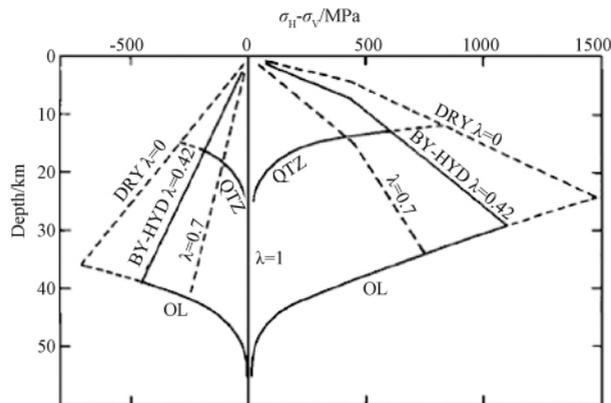


图 1 最大、最小水平主应力与垂向应力的差值随深度的变化 (Brace et al,1980)

λ 代表不同的孔隙压水平, σ_H 代表水平方向上的应力, σ_V 代表垂直方向的应力

2 数据

考虑到不同破裂模型引起的库仑应力分布的差异性,本文分别采用张勇(2010)、郝金来(2011)提供的玉树地震破裂模型反演结果作为发震模型(表1)。文中2个模型都将破裂面按走向和倾向划分成若干个子单元,每个子单元均对应不同的滑动角和滑动量。余震数据取主震发生后至2010年7月8日期间的余震序列目录,数据源于青海省区域地震台网目录。玉树周边更大范围内的地震数据取主震至2011年3月31日发生在($30^\circ \sim 37^\circ\text{N}$ 、 $90^\circ \sim 103^\circ\text{E}$)范围内的 $M_L \geq 3.0$ 地震,数据来源于全国地震统一编目系统(中国地震台网中心)。

表 1 青海玉树 $M_s7.1$ 地震破裂模型参数

模型	走向($^\circ$)	倾角($^\circ$)	平均滑动角($^\circ$)	长度(km)	宽度(km)	最大滑动量(m)	来源
1	119	83	0/90	3	3	1.44	张勇(2010)
2	99.2/126.8	75/90	-1	5	3.5	0.96	郝金来(2011)

3 结果与讨论

利用 Coulomb 3.3 软件(Toda et al 2005; Lin et al 2004)计算了玉树 $M_s7.1$ 地震在空间上产生的库仑破裂静应力变化 μ 取平均值 0.4(Stein et al 1994),计算深度为 10km。在考虑区域背景应力场的情况下得到最易破裂的余震断层参数为(走向 360° 、倾角 90° 、滑动角 180°)。图 2 是主震在最易破裂余震断层面上产生的库仑应力变化。由图 2 可见,玉树 $M_s7.1$ 主震发生后,在空间上产生的静态库仑破裂应力变化具有明显的空间分区特征,应力增加区域主要分布在主震破裂断层的两端和 NW、SE 两个方向,所增加的应力介于 0.01 ~ 4.9MPa 之间,2 个模型计算的最大值均在震中附近。震后记录到的 $M_L \geq 3.0$ 余震序列中,绝大部分余震均发生在正向触发区域,即玉树主震对大部分余震的发生有应力触发作用。库仑应力变化与余震分布的对应率主要是依据图像和余震空间分布对比给出的,具体求取方法是计算正向触发区域(即红色区域)的地震数目占研究区域内所有地震数目的百分比。基于模型 1、2 计算出的库仑应力变化图像略有不同,与余震空间分布的对应率也有一定的差异(模型 1 为 84%,模型 2 为 75%)。

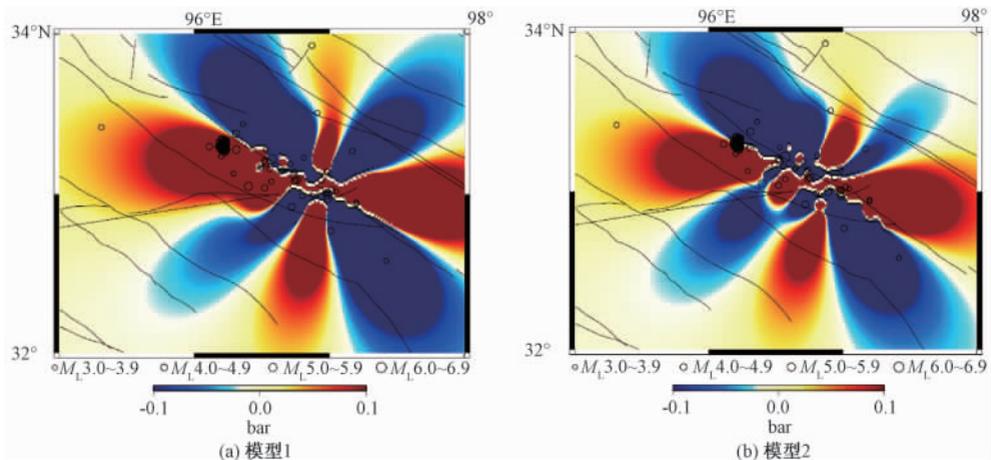


图 2 玉树主震在最易破裂余震断层面上产生的库仑应力变化(考虑构造应力场的情况下)

为了比较考虑区域应力场与单纯假定余震震源机制与主震完全一致等 2 种方法的优劣,图 3 给出余震断层机制与主震完全相同的库仑应力变化计算结果。震后记录到的 $M_L \geq 3.0$ 余震序列中,大部分余震也发生在正向触发区域,但余震对应率略低(模型 1 为 73%,模型 2 为 68%)。可见 2 种计算方法得到的库仑应力变化均与大多数余震的空间分布相吻合。进一步的对比结果显示,在考虑区域应力场的情况下,主震产生的库仑应力变化图像在破裂面邻域附近与余震活动的空间分布特征更为吻合。其原因可能在于,接收断层破裂机制受局部构造及区域应力场的共同制约,与主震断层机制不完全一致。因此,考虑区域应力场条件下给出的库仑应力触发图像,与余震空间分布区域吻合得更好。

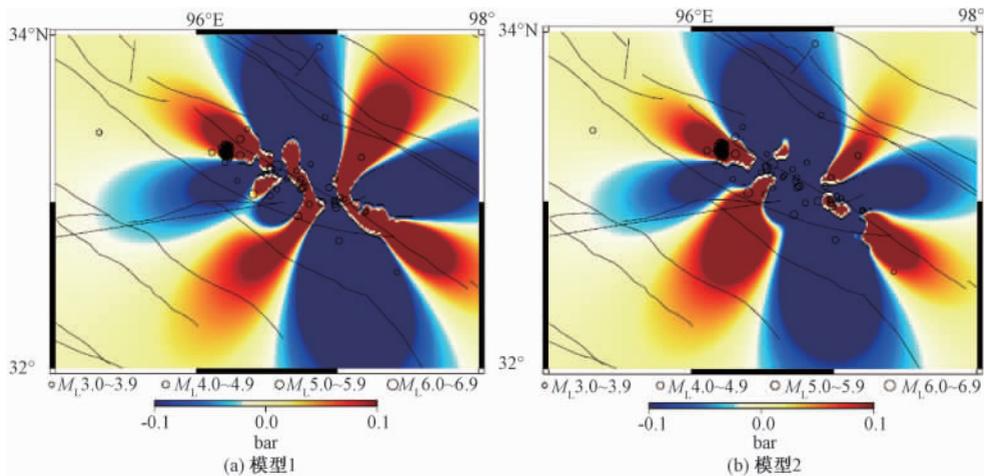


图 3 玉树主震在余震断层面上产生的库仑应力变化(假定余震震源机制与主震完全一致)

图 4 给出玉树主震对周边区域($30^\circ \sim 37^\circ\text{N}$ 、 $90^\circ \sim 103^\circ\text{E}$)地震活动的应力触发影响。结果显示,尽管库仑应力变化量值一般约为 10^{-4} MPa,小于一般认为的库仑应力能够触发地震的阈值 0.01 MPa(Reasenberget al,1992; King et al,1994; Hardebeck et al,1998; Harris,1998; Stein,1999),但有多达 86% 的区域地震活动(不含玉树余震序列)分布在玉树 7.1 级主震的正向应力触发区域,似乎对区域地震活动的增强也有一定的间接触发作用。

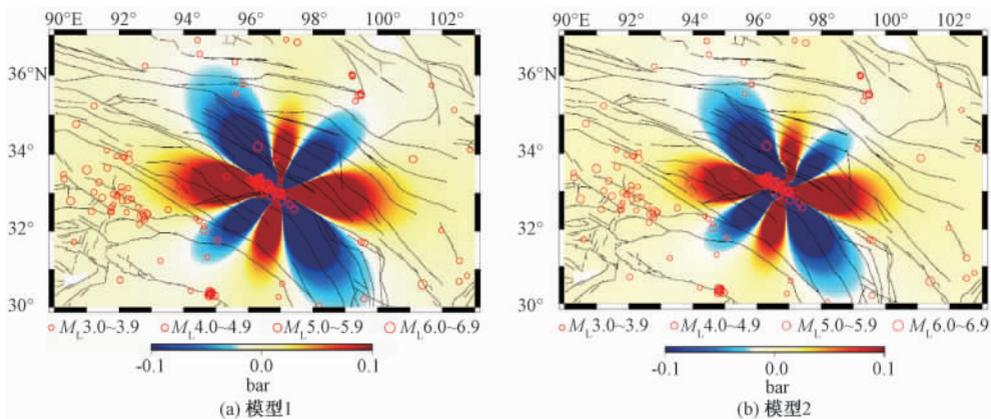


图 4 玉树主震对周边地区地震的应力触发影响(考虑构造应力场的情况下)

4 结论

计算了 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级地震对玉树地震序列余震分布以及周边区域 $M_L \geq 3.0$ 地震的库仑应力变化的影响。结果表明:

(1) 震后记录到的余震序列中,约 75% 以上的 $M_L \geq 3.0$ 余震发生在玉树主震库仑破裂应力变化的正向触发区域,应力变化最大达到 4.9MPa,说明玉树主震对大部分余震的发生有应力触发作用。

(2) 剔除余震序列的影响,周边 86% 的区域地震活动同样分布于玉树 7.1 级主震的正向应力触发区域。这意味着尽管应力变化量值较小,但玉树主震对周边区域中小地震活动也存在一定的触发作用。

(3) 对余震断层面考虑 2 种情形进行计算,一种是余震断层面与主震完全一致,另一种是结合主震震源区构造应力场及主震破裂得到最易破裂的余震断层面。结果显示,考虑区域应力场情况计算得到的库仑破裂应力变化图像,与余震及区域地震地震活动有更好的空间对应。

参考文献

- 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。
- 郝金来 2011,2011 年 3 月 11 日日本东北沿海地震与 2010 年 4 月 14 日玉树地震震源过程研究,博士学位论文,北京:中国科学院研究生院。
- 李闯峰、邢成起、蔡长星等,1995,玉树断裂活动性研究,地震地质,17(3),218~224。
- 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。
- 万永革、沈正康、曾跃华等 2008,唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究,地震学报,30(6),581~593。
- 闻学泽、徐锡伟、郑荣章等 2003,甘孜-玉树断裂的平均滑动速率与近代大地震破裂,中国科学 D 辑:地球科学,33(4),199~208。
- 许忠淮、汪素云、黄雨蕊等,1987,由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征,地球物理学报,30(5),476~486。
- 张勇、许力生、陈运泰 2010,2010 年青海玉树地震震源过程,中国科学 D 辑,地球科学,40(7),819~921。
- 周荣军、闻学泽、蔡长星等,1997,甘孜-玉树断裂带的近代地震与未来地震趋势估计,地震地质,19(2),115~124。
- Brace W, Kohlstedt D, 1980, Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments, J Geophys Res, 85(B11), 6248~6252。
- Byerlee J D, 1968, Brittle-ductile transition in rocks, J Geophys Res, 73, 4741~4750。
- Das S, Scholz C, 1981, Off-fault aftershock clusters caused by shear stress increase, Bull Seism Soc Amer, 71, 1669~1675。
- Hardebeck J L, Nazareh J J, Hauksson E, 1998, The static stress changes triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences, J Geophys Res, 103, 24427~24437。
- Harris R A, 1998, Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard, J Geophys Res, 103, 24347~24358。
- Jaeger J C, Cook N G W, 1976, Fundamentals of Rock Mechanics, 585, New York: John Wiley。
- King G C P, Stein R S, Lin J, 1994, Static stress changes and the triggering of earthquakes, Bull Seismol 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.
- Okada Y, 1992, Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull Seism Soc Amer* **82**, 1018 ~ 1040.
- Reasenber P A, Simpson R W, 1992, Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake, *Science* **255**, 1687 ~ 1690.
- Rice J R, 1992, Fault stress states, pore pressure distribution, and the weakness of the San Andreas fault, In: Evans B, Wong T, Feds, *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.
- Stein R S, King G C P, Lin J, 1994, Stress triggering of the 1994 $M = 6.7$ Northridge, California, earthquake by its predecessors, *Science* **265**(5177), 1432 ~ 1435.
- Toda S, Stein R S, Richards D 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.

The static stress triggering influence of the Yushu $M_s 7.1$ earthquake

Song Jin Jiang Haikun

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract This paper calculates the static stress changes generated by the Yushu $M_s 7.1$ earthquake in Qinghai Province. On the basis of regional stress, we take into account the static stress change triggered by the Yushu $M_s 7.1$ earthquake to find the optional fault plane. We then calculate the coulomb stress changes on the optional fault. The results indicate that most of aftershocks are triggered by the main shock. The image of the coulomb stress changes is also in accord with regional earthquakes ($M_L \geq 3.0$) distribution, but the value is lower than 0.01 MPa. In addition, this paper calculates the coulomb stress changes of the aftershock fault planes same as the mainshock. The comparison with the results in the previous calculation shows that the image of coulomb stress changes obtained by using "optional fault" method is more consistent with the distribution of Yushu aftershocks and regional earthquakes.

Key words: Yushu $M_s 7.1$ earthquake Coulomb stress changes Aftershock distribution
Regional stress