

芦山7.0级地震产生的应力变化场及其对滇东地区的影响研究^{*}

朱荣欢¹, 解朝娣², 赵小艳³, 雷兴林⁴, 严鑫⁵

(1. 昆明市防震减灾局, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学 地球物理系, 云南 昆明 650091;
3. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 4. 日本产业技术综合研究所, 日本 筑波 305-8567;
5. 昆明市东川区防震减灾局, 云南 东川 654100)

摘要: 根据芦山7.0级地震震源破裂过程的最新研究结果, 采用3个震源模型计算了地震产生的库仑破裂应力变化, 研究了库仑破裂应力变化的空间分布与余震活动分布的关系, 探讨芦山地震的发生对滇东地区影响。结果表明, 90%以上芦山地震的后续地震活动分布于正的库仑破裂应力区域, 余震活动受到了主震的应力触发作用。滇东地区一直处于应力闭锁状态, 芦山7.0级地震的发生, 可能对滇东的小江断裂带及其以西地区有一定的应力触发作用。

关键词: 芦山7.0级地震; 库仑破裂应力变化; 应力触发; 滇东地区

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2013)04-0455-07

0 引言

据中国地震台网测定, 北京时间2013年4月20日8时2分, 四川省雅安市芦山县境内(30.3°N, 103.0°E)发生 $M_s7.0$ 地震, 震源深度13 km, 最大滑动量159 cm, 断层破裂长度35~40 km。该地震发生在龙门山断裂带的南端, 2008年5月12日汶川 $M_s8.0$ 地震发生时, 这一地段没有发生破裂滑动, 该地震也是汶川地震后发生在龙门山断裂带上最强的一次地震(王卫民等, 2013); 芦山地震的破裂没有大规模出露地表, 主要地震灾害集中在断层上盘, 位于芦山县和宝兴县一带(张勇等, 2013)。

关于地震应力触发的研究主要是以计算库仑破裂应力变化为基础(Hardebeck *et al.*, 1998; Hill *et al.*, 1993; Toda *et al.*, 1998; 刘桂萍, 傅征祥, 2001; 万永革等, 2000; 解朝娣等, 2010a)。库仑破裂应力变化由主震断层位错产生, 并持久性地施加在后续断层上, 进而改变后续断层的稳定性。这类研究的广泛开展始于1992年美国Landers $M_w7.3$ 地震, King等(1994)计算得到该地震对

后续Big Bear $M6.5$ 地震产生的库仑破裂应力增量为2 Bar左右, 认为是Landers地震加速了Big Bear地震的发生。万永革等(2000, 2002)讨论了我国几次复杂地震中的应力触发问题, 提出地震产生的库仑破裂应力变化强烈依赖于地震破裂模型, 应采用合适的震源模型模拟地震位错。刘桂萍和傅征祥(2001)研究了海原大地震对古浪大地震的静态应力触发作用。

近年来我国发生了几次强震事件, 每次强震的发生都会改变周边地区的应力场, 进而引起区域活动的变化。此次芦山地震的发生是否会造成邻近地区或断层上的应力变化? 对余震分布以及后续地震活动趋势是否会有影响? 为此, 笔者利用收集到的3个芦山地震的震源破裂模型, 采用最优取向断层面投影, 计算芦山地震产生的库仑破裂应力变化场。在此基础上, 分析研究区域的后续地震活动性, 探讨芦山地震对滇东地区的地震危险性影响。

1 构造背景

芦山 $M_s7.0$ 地震发生在龙门山断裂带南段的

^{*} 收稿日期: 2013-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金(41104036)资助.

前山断裂附近。龙门山断裂带属于中生代造山作用形成的断裂带,长约 500 km,是青藏高原的巴颜喀拉地块向东南运动,受到四川盆地阻挡,应力积累和释放的结果。龙门山断裂带主要由近北东走向的 3 条断裂带构成:沿汶川—茂县的龙门山后山断裂带;沿映秀—北川的龙门山中央主断裂带;沿灌县—江油的龙门山前山断裂带(王卫民等, 2013)。

2 原理和方法

根据库仑破裂准则,使岩石破裂失稳的库仑破裂应力(King *et al.*, 1994)为

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu(\sigma_\beta - P). \quad (1)$$

其中, σ_β 为断层面上的正应力(压缩为正), τ_β 为切应力, P 为孔隙流体压力, μ 为断层面介质的摩擦系数。

如果断层面与主应力 σ_1 轴的夹角为 β , 则正应力和切应力可以表示为

$$\sigma_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\cos 2\beta, \quad (2)$$

$$\tau_\beta = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)\sin 2\beta. \quad (3)$$

其中, σ_1 是最大主应力, σ_3 是最小主应力, 式(1)可以变为

$$\sigma_f = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)(\sin 2\beta - \mu \cos 2\beta) - \frac{1}{2}\mu(\sigma_1 + \sigma_3) + \mu P. \quad (4)$$

对式(4)求 β 的偏微分, 可以发现当 β 满足 $\cot 2\beta = -1/\mu$ 时, 库仑破裂应力取最大值 σ_f^{\max} 。如式(1)所示, 孔隙流体压力 P 调制着断层面上的有效正应力, 当岩石应力的改变远远快于岩石中的流体压力扩散, 则流体压力 P 可以通过 Skempton 系数 B 在式(1)中得到反映, 并取视摩擦系数 $\mu' = \mu(1 - B)$, 则式(1)变为

$$\sigma_f = \tau_\beta - \mu' \sigma_\beta. \quad (5)$$

μ' 包括了孔隙流体和断层面上的介质特性, 一般 μ' 取 0.2 ~ 0.8, 此处取为 0.4。由于难以对地壳

应力值直接进行精确测量, 因此利用库仑破裂应力变化可估计应力的相对变化, 进而式(5)改写为

$$\Delta \sigma_f = \Delta \tau_\beta - \mu' \Delta \sigma_\beta. \quad (6)$$

其中, $\Delta \sigma_\beta$ 为断层面上的正应力变化, $\Delta \tau_\beta$ 为切应力变化(Harris, 1998)。

库仑破裂应力变化定义于具体的断层面, 最优取向断层面是指计算库仑破裂应力变化时, 某一产状接收断层面上计算得到的库仑应力变化大于同一地点其他产状的接收断层面上得到的应力变化幅值, 这类产状的接收断层即是最优取向断层。以最优取向断层面投影计算得到的应力变化空间分布, 可以解释余震分布情况, 也可以预测未来后续地震活动的空间分布。要计算最优取向断层面上的库仑破裂应力变化, 首先用 Okada (1992) 给出的静态位移和应变的解析表达式, 计算震源断层在接收断层处产生的应变分量, 由胡克定律计算出应力分量 σ_{ij}^q 。然后将已计算出的 σ_{ij}^q 和区域构造应力 σ_{ij}^r 叠加得到总应力 σ_{ij}^t

$$\sigma_{ij}^t = \sigma_{ij}^r + \sigma_{ij}^q. \quad (7)$$

由总应力 σ_{ij}^t 确定主应力轴方向, 设 θ 为最大主应力轴与 x 轴的夹角, 则 θ 为

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2\sigma_{xy}^t}{\sigma_{xx}^t - \sigma_{yy}^t} \right). \quad (8)$$

此时最优取向断层面的方向 ψ_0 通过 $(\theta \pm \beta)$ 得以确定, 虽然最优取向断层面的方向性通过总应力确定, 但是该断层面上的正应力和切应力变化值却只取决于震源断层产生的应力变化, 因此在最优取向断层面上的库仑破裂应力变化表示为

$$\sigma_{33} = \sigma_{xx}^q \sin^2 \psi_0 - 2\sigma_{xy}^q \sin \psi_0 \cos \psi_0 + \sigma_{yy}^q \cos^2 \psi_0, \quad (9)$$

$$\tau_{13} = \frac{1}{2}(\sigma_{yy}^q - \sigma_{xx}^q) \sin 2\psi_0 + \tau_{xy}^q \cos 2\psi_0. \quad (10)$$

求得 σ_{33} 和 τ_{13} 的相对变化 $\Delta \sigma_{33}$ 与 $\Delta \tau_{13}$, 进而最优取向投影方向上的库仑破裂应力变化为

$$\Delta \sigma_f^{\text{opt}} = \Delta \tau_{13} - \mu' \Delta \sigma_{33}. \quad (11)$$

3 资料

3.1 后续地震活动

本文使用的地震资料来源于中国地震台网地震目录，选用了芦山 $M_s7.0$ 地震后 2013 年 4 月 20 日至 2013 年 5 月 10 日 $M_s \geq 1.0$ 的 3 014 次后续余震活动（图 1），其中： $M_s5.0 \sim 5.9$ 余震 4 次， $M_s4.0 \sim 4.9$ 余震 45 次， $M_s3.0 \sim 3.9$ 余震 237 次， $M_s2.0 \sim 2.9$ 余震 611 次， $M_s1.0 \sim 1.9$ 余震 2 117 次。目前最大余震为 4 月 21 日 17 时 05 分发生在芦山、邛崃交界的 $M_s5.4$ 地震。与汶川地震相比，芦山地震余震水平低很多，属于 7 级地震余震的正常水平。到目前为止，没有 6 级以上余震，随着应力释放，3 级以上余震会逐渐减少。

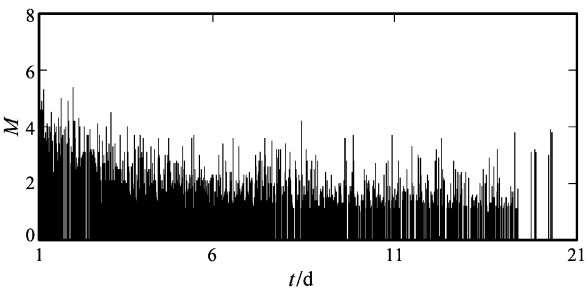


图1 芦山地震 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ chart of Lushan $M_s7.0$ earthquakes

3.2 震源模型和其他计算参数

使用具有可变滑动分布的震源模型计算库仑破裂应力变化，可变滑动震源模型通常可由 GPS 观测资料、波形记录和地质调查结果等综合得到（解朝娣，2010b）。笔者采用了王卫民模型（王卫民等，2013）、张勇模型（张勇等，2013）和刘成利模型（刘成利等，2013）共 3 个可变滑动震源模型，模型的相关参数见表 1。张勇模型选取了一个足够大的长 63 km、宽 48 km 的平面作为潜在的破裂断层面，将其划分为 21×16 个子断层，每个子断层的尺度为 3 km \times 3 km，震中位置采用 USGS 发布的震中位置（30.284°N，102.956°E）和震源深度（12.3 km）。刘成利模型将震源断层分为 19×10 个子断层，每个子断层的长度为 3.5 km，宽度为 3.5 km。王卫民模型将芦山地震震源破裂分为 11×7 个子断层，每个子断层的长度为 6 km，宽度为 5 km，最大滑动 159 cm。

表 1 3 个震源模型的主要参数

Tab. 1 Main parameters of the three source models

| 模型 | 深度 /km | 断层产状 | | 断层长度 /km | 断层宽度 /km |
|-----|-----------|--------|--------|-------------|-------------|
| | | 走向/(°) | 倾角/(°) | | |
| 王卫民 | 10.2 | 205 | 38.5 | 66 | 35 |
| 张勇 | 12.3 | 219 | 33 | 63 | 48 |
| 刘成利 | 12.4 | 219 | 35 | 66.5 | 35 |

根据杜义等（2009）给出的龙门山地区的构造应力张量的研究结果（表 2），区域现代构造应力场以近水平挤压为主，方位角 271°，鉴于该地区构造应力场的绝对大小没有定量的研究结果，借鉴相关研究的处理方法（King *et al*，1994），取主应力的大小值为 10 MPa。计算中地壳的剪切模量取 3.3×10^{10} Pa，泊松比取为 0.25。采用最优取向断层面投影法（King *et al*，1994）计算芦山地震产生的库仑破裂应力变化场，结果如图 2 所示。

表 2 区域构造应力场主要参数

Tab. 2 Main parameters of regional tectonic stress field

| | 方位角/(°) | 倾角/(°) |
|------------------|---------|--------|
| 最大主应力 σ_1 | 271 | 10 |
| 中间主应力 σ_2 | 5 | 21 |
| 最小主应力 σ_3 | 158 | 66 |

4 计算结果

4.1 芦山地震产生的应力变化空间分布与后续地震活动分布的相关性

越来越多的研究表明，余震往往分布在主震引起的应力场变化为正值的地区，即应力加载区（Hardebeck *et al*，1998；Hill *et al*，1993；Toda *et al*，1998；刘桂萍等，2001；万永革等，2000；解朝娣等，2010a，b）。本文首先计算库仑破裂应力变化，然后分析余震是否落在库仑破裂应力增加区。

从图 2 中可以看出，3 种模型计算出的芦山地震产生的库仑应力变化的空间分布具有一定相似性，应力增大区与减少区相间出现，即呈现应力变化正负相间的花瓣特征。

采用张勇模型计算出主要应力增加区分布于震中位置的正北和西南两个邻近区域，此外还有一个的显著增加区域位于震中的南部地区，应力

增加区包括了芦山、天全一带,最大的应力减小区分布于震源断层的東西两侧。采用王卫民模型计算出的结果有 2 个主要的应力增加区和 2 个应力减小区,对称性较好。应力增加区主要位于震中的正北和正南两个邻近区域,而应力减小区主要位于断层的東西两侧,这与张勇模型结果一致。采用刘成利模型计算出的结果显示应力增加区主要位于断层展布方向的南北两个端部区域和断层区域,应力减小区也分布于断层的東西两侧。

采用张勇模型计算出的结果显示,超过 90% 的后续地震活动分布在应力增加区;采用刘成利模型和王卫民模型的计算结果也表明多数后续地震活动分布在应力增加区。张勇模型的计算结果能更好地解释后续地震活余震的分布情况,较好地说明了芦山地震对后续余震的触发作用。

未来余震活动较为危险的区域主要是宝兴和芦山一带,天全县和荥经县也可能是未来余震发生的危险区域。应力变化的这种分布特征主要受到震源断层模型的空间展布形态、滑动方向和静态滑动量分布的影响。鉴于以张勇模型的计算结果能解释后续地震活动的分布,因此,以该模型分析芦山地震产生的应力变化对滇东地区的影响。

4.2 芦山地震产生的应力变化对滇东地区的影响

芦山地震之后,人们最关心的是其对周围断裂的影响和对周边地区地震活动性的影响。川滇菱形块体恰好处于龙门山断裂的西南面,川滇菱形块体的南区是滇东地区,该地区分布有小江断裂带、大关—马边断裂带、曲江断裂和石屏—建水断裂等。小江断裂带具有地震强度大的特征,历史上该类型周围发生过多地大震,其中发生的最大地震是 1833 年嵩明 8.0 级地震,这也是云南省有记载的最大地震,1733 年发生东川紫牛坡 7.8 级地震;在曲江断裂带上发生的最大地震是 1970 年通海 7.7 级地震。以小江断裂为界,在小江断裂及其以西的地区,小震地震活动比较频繁,而小江断裂以东地区,小震活动相对较弱(林向东, 2009)。目前滇东地区 6.5 级以上地震已经平静了 17 年,小江断裂带 6 级以上地震已经平静了 47 年,且小江断裂带现今仍在活动,是一条强烈破坏性地震频发的地震带(钱晓东, 秦嘉政, 2008)。因此本文将研究计算区域扩展至滇东地区。

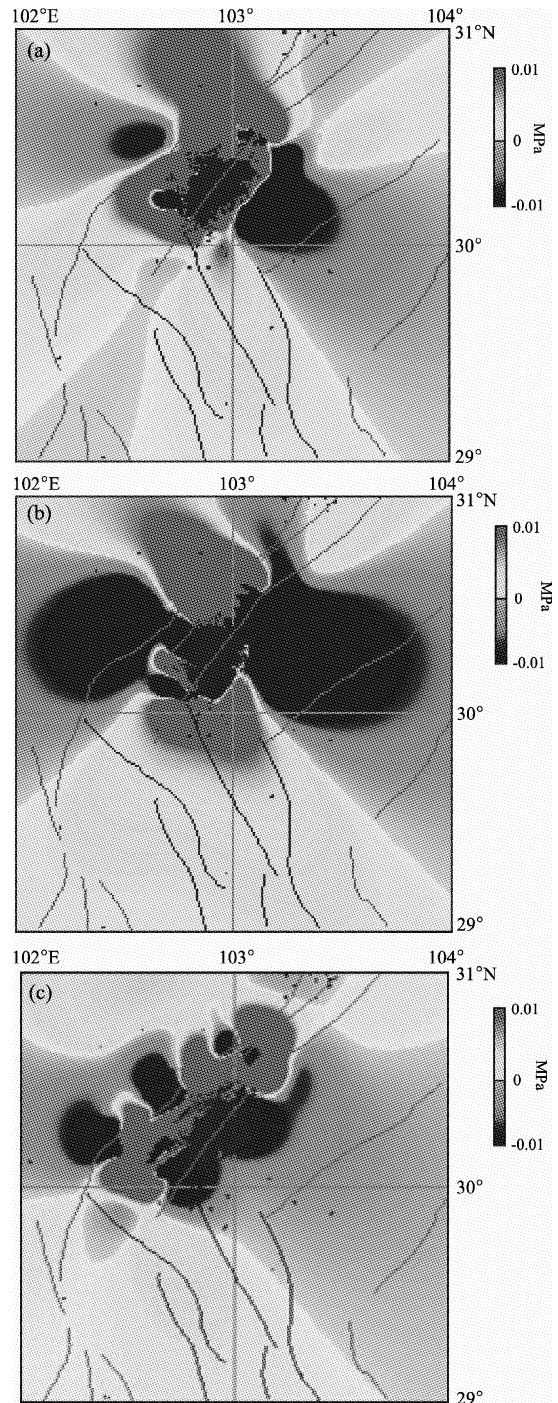


图 2 3 个震源模型计算出的芦山地震产生的库仑应力变化与后续地震活动的空间分布

(黑色圆点表示研究时段内的地震活动)

(a) 张勇模型; (b) 王卫民模型; (c) 刘成利模型

Fig. 2 Coulomb stress changes caused by Lushan $M_s 7.0$ earthquake based on three source models and spatial distribution of its subsequent seismic activities (the black circle dot represents the seismic activity in study period)

(a) source model of Zhang *et al*; (b) source model of Wang *et al*; (c) source model of Liu *et al*

库仑破裂应力变化的计算采用最优取向断层面投影法。根据云南地区、尤其是滇东地区的构造应力场相关研究（林向东，2009），小江断裂区域应力主要为 NW 向；小江断裂以东的滇东地区，最大主应力方位大致为 NNW，最小主应力方位为 SWW；小江断裂以西的滇中及滇西地区最大主应力方位也大致为 NNW，最小主应力方位为 SWW。表 3 列出了滇东地区构造应力场主要参数，主应力取为 10 MPa，因滇东地区的构造应力场的研究结果分为小江断裂带以东和以西两个结果，所以本文将分别采用小江断裂带以东和以西的构造应力计算库仑破裂应力变化的空间分布。计算中地壳的剪切模量取 3.3×10^{10} Pa，泊松比取为 0.25，结

果如图 3 所示。

表 3 滇东地区构造应力场主要参数
Tab. 3 Main parameters of tectonic stress field
in the east Yunnan areas

| 应力场主要参数 | 方位角/° | 倾角/° |
|----------------------------|-------|------|
| 小江断裂带以东地区的最大主应力 σ_1 | 144 | 10 |
| 小江断裂带以东地区的中间主应力 σ_2 | 39 | 56 |
| 小江断裂带以东地区的最小主应力 σ_3 | 240 | 32 |
| 小江断裂带以西地区的最大主应力 σ_1 | 137 | 5 |
| 小江断裂带以西地区的中间主应力 σ_2 | 32 | 71 |
| 小江断裂带以西地区的最小主应力 σ_3 | 229 | 18 |

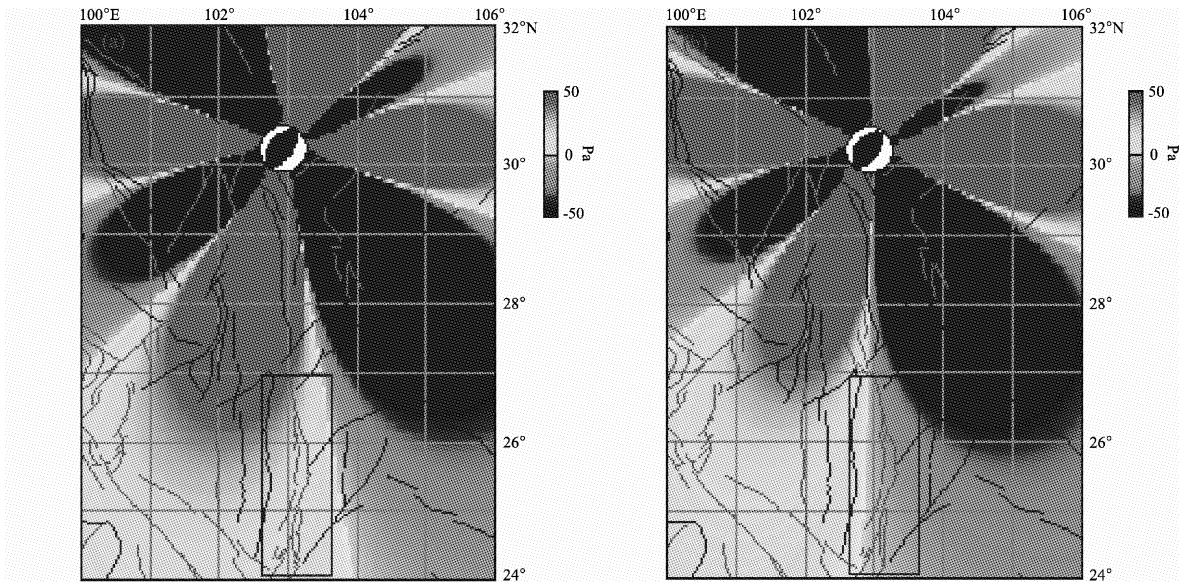


图 3 芦山地震产生的库仑应力变化对滇东地区影响（矩形框代表小江断裂带位置）
(a) 以小江断裂带以西地区的构造应力场计算出的应力分布；(b) 以小江断裂带以东地区的构造应力场计算出的应力分布

Fig. 3 Influence of the coulomb stress changes caused by Lushan $M_s7.0$ earthquake on the east Yunnan areas (the rectangle indicates the location of Xiaojiang Fault)

(a) stress distribution calculated by the tectonic stress for the western region to the Xiaojiang Fault; (b) stress distribution calculated by the tectonic stress for the eastern region to the Xiaojiang Fault

5 结论和讨论

笔者以芦山地震产生的库仑破裂应力变化的计算结果为基础，选取 3 个芦山地震的震源破裂反演结果，研究了库仑破裂应力变化与余震活动相关性，并探讨了芦山地震的发生对滇东地区的影响。结果表明，超过 90% 的芦山地震的后续地震

活动集中分布在正的库仑破裂应力区域，余震活动受到了一定的主震引起的应力触发作用。芦山地震的发生，可能对滇东的小江断裂带及其以西地区有一定的应力触发作用。

采用小江断裂带以西的构造应力场研究结果计算库仑破裂应力变化空间分布，结果显示小江断裂带及其以西地区受到了芦山地震产生的应力加载作用。并且整个小江断裂带都是处于显著的

应力加载区,虽然应力增加的幅值并不显著;采用小江断裂带以东的构造应力场研究结果计算库仑破裂应力变化空间分布,结果显示小江断裂带是处于芦山地震产生的应力卸载区的边缘地带。

综合考虑两个结果,笔者认为小江断裂带有可能受到较小的加载作用,但是由于距离芦山地震较远,触发作用并不显著。因为研究断层之间的相互作用,主要是考察发震断层在后续断层上产生的库仑破裂应力变化是否为正值,如果为正值即为加载作用,否则为卸载作用(解朝娣等,2010a, b)。主震对某一断层是否具有触发作用不仅取决于库仑应力大小,还与被触发断层的应力状态和性质有很大关系,如果断层的应力属于临界状态,微小的库仑应力扰动可能触发地震,如果断层应力处于亚临界状态,需要通过应力积累才能发生地震,这是由于触发存在时间延迟(张彬等,2012)。另外库仑应力的变化情况与断层产状、断层的力学性质、摩擦强度以及地震的位错模式有关。要提高库仑应力变化计算精度,必须正确考虑这些因素。库仑应力的变化只是地震的一个触发因素,能否发生地震主要还取决于断层自身的应力状态(王连捷等,2008)。

鉴于小江断裂带自1966年东川6.2、6.5级地震至今6级以上地震已经平静了47年。芦山地震产生的应力变化对小江断裂带的作用将是持久的,有可能引起大震的提前发生,其地震危险性值得重视。

感谢熊老师、张勇老师、王卫民老师为本次工作提供的宝贵数据和热心帮助。

参考文献:

杜义,谢富仁,张俊亮,等.2009.汶川 $M_s8.0$ 地震断层滑动机制研究[J].地球物理学报,52(2):464-473.

解朝娣,朱元清,Lei X L.2010a. $M_s8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J].中国科学,40(6):688-698.

解朝娣,朱元清,雷兴林,等.2010b.汶川8.0级地震的余震触发作

用和对断层的应力加卸载作用[J].地震地磁观测与研究,31(2):12-18.

林向东.2009.小江断裂中段及其邻近地区震源机制解与构造应力场分析[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,34-40.

刘成利,郑勇,葛黎.2013.2013年芦山7.0级地震的动态破裂过程[J].中国科学(D辑),43(6):1020-1026.

刘桂萍,傅征祥.2001.海原大地震对古浪大地震的静应力触发研究[J].地球物理学报,44(z1):107-115.

钱晓东,秦嘉政.2008.小江断裂带及周边地区强震危险性分析[J].地震研究,31(4):354-361.

万永革,吴忠良,周公威,等.2000.几次复杂地震中不同破裂时间之间的“应力触发”问题[J].地震学报,22(6):568-575.

万永革,吴忠良,周公威,等.2002.地震静态应力触发模型的全球检验[J].地震学报,24(3):301-315.

王连捷,周春景,孙东生,等.2008.汶川“5·12”地震引起的库仑应力变化及其对周边地震活动的影响[J].地质力学学报,14(3):193-200.

王卫民,郝金来,姚振兴.2013.2013年4月20日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J].地球物理学报,56(4):1412-1417.

张彬,陆远忠,刘耀炜.2012.2000年苏门答腊 $M_s8.0$ 地震对缅甸 $M_s6.5$ 地震动态应力触发作用及影响因素[J].吉林大学学报,42(增刊2):399-406.

张勇,许力生,陈运泰.2013.芦山“4·20”地震破裂过程及其致灾特征初步分析[J].地球物理学报,56(4):1408-1411.

Hardebeck J L, Nazareth J, Hauk son E.1998. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences[J]. J Geophys Res, 103(B10):24347-24358.

Harris R A.1998. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard[J]. J Geophys Res, 103(B10):24347-24358.

Hill D P, Reasenberg P A, Michael A, et al.1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake method[J]. Science, 260(5114):1617-1623.

King G C P, Stein R S, Lin J.1994. Static stress changes and the triggering of earthquake[J]. Bull Seismol Soc Am, 84(3):935-953.

Okada Y.1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space[J]. Bull Seismol Soc Am, 82(2):1018-1040.

Toda S, Stein R S, Reasenberg F, et al.1998. Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: effect on aftershocks and future earthquake probabilities[J]. J Geophys Res, 103(B10):24543-24565.

Research on Influence of Coulomb Stress Changes Induced by Lushan $M_s7.0$ Earthquake on Eastern Yunnan Areas

ZHU Rong-huan¹, XIE Zhao-di², ZHAO Xiao-yan³, LEI Xing-Lin⁴, YAN Xin⁵

(1. *Kunming Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Bureau, Kunming 650500, Yunnan, China*)

(2. *Department of Geophysics of Yunnan University, Kunming 655009, Yunnan, China*)

(3. *Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650024, Yunnan, China*)

(4. *Geological Survey of Japan, AIST, Tsukuba 305-8567, Japan*)

(5. *Dongchuan Earthquake Prevention and Disaster Mitigation Bureau, Dongchuan 654100, Yunnan, China*)

Abstract

The Lushan $M_s7.0$ earthquake occurred on Apr. 20, 2013 in Lushan Country, Ya'an City, Sichuan Province. According to the newest research results of source rupture process for Lushan $M_s7.0$ earthquake, we used three source models to calculate the coulomb failure stress changes induced by the Lushan $M_s7.0$ earthquake, and analyze the relationship between the spatial distribution of coulomb failure stress changes and the aftershock activity distribution. Moreover, we discussed the influence of Lushan $M_s7.0$ earthquake on the Eastern Yunnan. The results show that the more than 90% of aftershock activities distributed in the areas with the positive coulomb failure stress, which were triggered by the stress effect of main shocks, Lushan $M_s7.0$ earthquake might have stress triggering on Xiaojiang Fault and its adjacent western region, for the reason that Eastern Yunnan was on the stress blocking state.

Key words: Lushan $M_s7.0$ earthquake; coulomb failure stress change; East Yunnan areas; stress triggering