

# 四川芦山 $M_s$ 7.0 级地震导致周边断层的应力变化

董培育, 程惠红, 曾祥方, 石耀霖

中国科学院计算地球动力学重点实验室; 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

**摘要** 2013年4月20日, 四川雅安市芦山县发生  $M_s$  7.0 级强烈地震, 造成重大的人员伤亡和经济损失。地震造成的区域库仑应力变化、对周围断层的影响及后续地震带发展趋势是应该关注的问题。利用 USGS 震源机制解, 根据地震静态触发原理, 基于弹性位错理论和分层地壳模型, 计算得出芦山地震引起同震库仑应力变化从断层的 1.0MPa 量级减小到 200km 外的 0.1kPa, 研究认为在地震之后大部分区域的应力得到释放, 鲜水河断裂道孚—康定段和玉龙希断裂南段危险性增加。

**关键词** 芦山  $M_s$  7.0 级地震; 应力触发; 库仑应力变化

**中图分类号** P315

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.12.002

## Stress Changes on Major Faults Caused by $M_s$ 7.0 Lushan Earthquake

DONG Peiyu, CHENG Huihong, ZENG Xiangfang, SHI Yaolin

Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences; College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** On April 20, 2013, a  $M_s$  7.0 earthquake happened in Lushan, Sichuan Province, which killed and hurted hundreds of people, also resulted in huge financial loss. People usually cared about the changes of coulomb failure stress caused by the earthquake, and the effect on the adjacent faults, and subsequent progress after this earthquake. Based on seismic static triggering principle, the elastic dislocation theory, layered crustal model, we used the USGS focal mechanism solution, the coseismic coulomb failure stress is 1.0MPa to 0.1kPa from fault plane to 200km, stress was released in most of the area, however, the Daofu and Yulongxi Segment of Xianshuihe Fault became more dangerous.

**Keywords** Lushan  $M_s$  7.0 earthquake; earthquake trigger; coulomb stress changes

### 0 引言

2013年4月20日 08:02, 在龙门山断裂西南段发生了四川芦山  $M_s$  7.0 级强烈地震。地震震中位于  $30.3^\circ\text{N}, 103.0^\circ\text{E}$ , 震源深度为 13km, 断层面上最大滑动量约 1.5m (<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/266810.shtml>)。地震造成西南向东北方向发展的破裂带长度约为 20km, 沿断层倾角方向的范围主要在 12~25km, 破裂持续时间达 25s ([http://www.stdaily.com/stdaily/content/2013-04/21/content\\_595610.htm](http://www.stdaily.com/stdaily/content/2013-04/21/content_595610.htm))。地震释放巨大能量不仅引起强烈地面震动, 还诱发了滑坡、塌方等地质灾害, 造成 50 多座水库受损, 影响正常供水 ([http://politics.people.com.](http://politics.people.com.cn/n/2013/0421/c70731-21219690.html)

[cn/n/2013/0421/c70731-21219690.html](http://politics.people.com.cn/n/2013/0421/c70731-21219690.html))。

地震的发生是一个区域应力调整、应变能释放的过程。那么, 四川芦山地震造成断层面及周围区域、断层库仑应力如何变化? 对余震分布、后续地震带发展趋势如何影响? 科学家在研究地震如何发生、在哪发生等地震预报时发现, 在初始应力场不完全明确的情况下地震发生时会产生应力调整, 在断层附近生成应力影, 可以通过库仑破裂应力变化来研究分析地震发生的时间、地点以及主震与余震的关系等应力触发地震的问题<sup>[1-2]</sup>。

川滇地区是板内地震活动频繁地区, 断层构造发育, 3 个

收稿日期: 2013-04-22

基金项目: 国土资源部行业基金地壳深部探测项目 (SinoProbe-07)

作者简介: 董培育, 博士研究生, 研究方向为计算地球动力学, 电子信箱: dongpeiyu97@163.com; 石耀霖 (通信作者), 教授, 中国科学院院士, 第三世界科学院院士, 研究方向为地球动力学, 电子信箱: shiyil@ucas.ac.cn

地震活动带(鲜水河断裂带、龙门山断裂带和安宁河、则木河地震带)控制了该区域地震活动<sup>[3]</sup>。龙门山断裂带处于青藏高原东缘与四川盆地的交汇处,是南北构造带中部一个重要的构造单元,具有十分复杂的地质结构和演化历史<sup>[4]</sup>。雅安地区处于龙门山断裂带西南段中强震交汇区,其北部有汶川、松潘、平武等强震区,西部有康定—炉霍强震区,南部有冕宁—西昌强震区<sup>[5]</sup>(图 1)。陈群策等<sup>[6,7]</sup>开展了钻孔原地应力测量工作,认为龙门山断裂带现今地应力作用方向呈现分段性,西南段在汶川地震后仍然积累有较高的地应力,具有潜在大震危险性。2008 年汶川  $M_s$  8.0 级地震发生在龙门山断裂带东北方向,破裂长达近 300km,几乎整个龙门山断裂带都发生了破裂,但是在龙门山的西南段约 100km 没有发生破裂,石耀霖等<sup>[8]</sup>基于不同研究者反演的地震破裂模型对汶川地震造成的库仑应力变化计算显示,龙门山断裂带西南段附近应力集中,地震危险性增加,而此次四川芦山地震发生在此段上。因此,在区域地应力场大小、方向不确定情况下,可以计算四川芦山地震震后周围区域、邻近断层库仑应力变化,判断哪些区域或断层变得更加危险,哪些区域或断层危险性减小,进而估算对后续地震的影响。本文分别采用弹性分层地壳模型和黏弹性松弛模型,利用 USGS 震源机制解,计算四川芦山地震同震位错引起的不同深度震后应力调整和邻近鲜水河、玉龙溪、龙泉山、北川—映秀、彭县—灌县和抚边河断层的库仑应力变化。

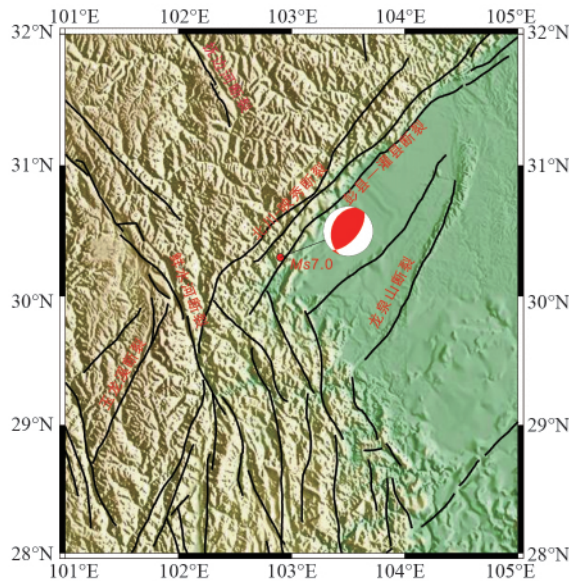


图 1 龙门山断裂带区域断层分布

Fig. 1 Distribution of the fault in Longmenshan Fault zone

## 1 原理和模型

### 1.1 震后库仑应力变化计算

1969 年 Jaeger 和 Cook<sup>[8]</sup>描述库仑破裂应力 (Coulomb Failure Stress, CFS) 为

$$CFS = |\tau_f| + \mu(\sigma_n + P) - C \quad (1)$$

式中,  $\Delta\sigma_n$  为正应力,  $|\tau_f|$  为剪应力,  $\mu$  为摩擦系数,  $P$  为孔隙压力, 当  $\mu$  和  $C$  为常数时, 库仑破裂应力变化可以写为

$$\Delta CFS = \Delta |\tau_f| + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (2)$$

设地震发生前构造应力场  $\sigma_{ij}^0$ , 地震后应力场变化了  $\Delta\sigma_{ij}$ , 由震源机制解得到发震断层几何参数 (走向、倾角和滑动角), 则可求出断层面法向量  $(n_1, n_2, n_3)$  及大震引起正应力和剪应力变化量分别为

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_n &= \Delta\sigma_{ij}n_i n_j \\ \Delta\tau &= \Delta\sigma_{ij}s_i \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\Delta\sigma_{ij}$  是断层面上正应力变化,  $\Delta\tau$  是沿断层面剪应力沿滑动方向的变化,  $n_i$  是断层面的法向量,  $s_i$  是地震断层滑动矢量, 经张量计算可以求出大震造成断面上的库仑应力变化  $\Delta CFS$ , 其表达式为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P) \quad (4)$$

其中,  $\Delta P$  是孔隙压力变化。在此, 暂不考虑孔隙压力的影响。由  $\Delta CFS$  可以得出: 如果断面上的库仑应力变化为正值, 表明断层滑动危险性增大; 反之, 库仑应力变化为负值, 则表明断层趋于稳定, 更加安全。通过库仑应力计算, 可以了解哪些地方、哪种走向倾角和哪种性质的断层相对变得更危险或更安全。库仑应力增加最大的地方, 如果原来应力水平较低, 未必就是未来发生地震的地方; 库仑应力增加虽然不太大, 但是原来应力水平已经很高, 则也可能是未来的震源。

### 1.2 计算模型

Wang<sup>[9,10]</sup>提供了基于位错理论的弹性分层模型 EDGM/EDCMP 和黏弹性松弛同震及震后应力计算程序 PSGRN/PSCMP, 计算中将地震断层位错作为扰动源, 计算该扰动在模型中所产生的同震应力场变化及震后应力松弛情况, 表 1<sup>[11]</sup>为计算中分层地壳模型参数, 地震位错分布, 根据远震体波反演得到的有限断层模型, 破裂区域半径约为 10km, 最大位错量超过 1m。

表 1 芦山地震震源区地壳地震波速度模型

Table 1 Seismic velocity model of Lushan earthquake hypocenter

层数	深度/km	P 波波速 / (km·s <sup>-1</sup> )	S 波波速 / (km·s <sup>-1</sup> )	密度 / (kg·m <sup>-3</sup> )
1	1.5	2.5	1.2	2100
2	6.5	4.5	2.6	2500
3	9.0	6.2	3.6	2800
4	12.0	6.4	3.6	2850
5	12.0	6.8	3.8	2950

## 2 四川芦山震后周围区域及断层库仑应力变化

### 2.1 周围区域不同深度库仑应力变化

四川芦山地震是一个比较典型的逆冲地震, 库仑应力变化随着深度变化, 因此本文计算了不同深度库仑应力变化

值。图 2 给出了基于弹性分层模型,采用 USGS 震源机制解(走向 220°、倾角 34°、滑动角 112°),对发震断层类型的潜在断层,计算得出的四川芦山区域 5、10、13 和 20km 深度处的库仑应力变化,由于芦山地震造成的库仑应力变化随断层的距离增大迅速衰减,从断层面附近的 1.0MPa 量级减小到 200km 外的 0.1kPa 量级。为了更好地反映远场库仑应力变化,绘制了库仑应力对数的分布,库仑应力增加区为深浅不

同的红色,库仑应力减少区取其绝对值的对数,用深浅不同的蓝色表示。不同深度的库仑应力变化趋势大体一致,发震断层两侧库仑应力变化为负,断层两端库仑应力增加。大部分余震发生在库仑应力增加区域。断层两侧远场再发生类似逆断层的危险性则大大减小。图 2 中,中心点为主震震中,东为  $x$  正方向,北为  $y$  正方向,黑色区域为中国地震台网快报目录提供 4 月 22 日 09:30 的余震(data.earthquake.cn)。

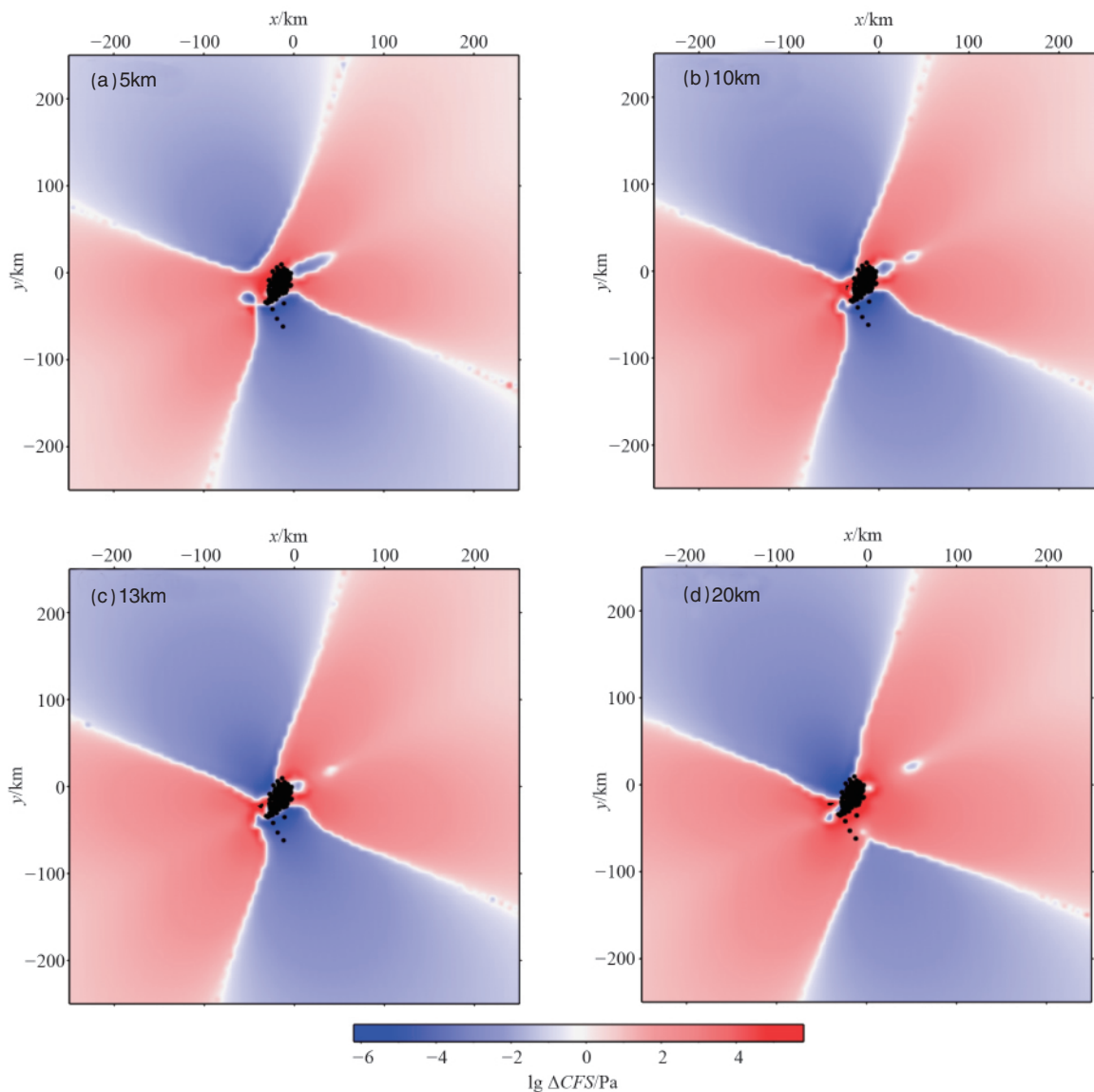


图 2 四川芦山地震周围区域不同深度上库仑应力变化

Fig. 2 Distribution of the changes of coulomb stress around the Lushan earthquake area

## 2.2 邻近断层库仑应力变化

参考文献[11]给出的四川芦山地震周围各断层及断层参数如表 2 所示,由同震应力变化场求解邻近各个断层库仑应力变化。图 3 给出了四川芦山地震对邻近断层(鲜水河、玉龙希、抚边河、龙泉山、彭县—灌县、北川—映秀断层)的库仑应力变

化图,可以看出芦山地震对周围 100~200km 范围的其余断层造成的库仑应力变化量,一般最大不超过 0.8kPa。在地震之后大部分区域的应力得到释放,库仑应力变化量一般小于 0.8kPa;但也有部分区域的应力在地震后增加,在鲜水河断裂的道孚—康定段的库仑应力变化为正值,增加量可达 0.8kPa。

表 2 四川芦山地震周围各断层及断层参数  
Table 2 Parameters of faults around the Lushan earthquake area

断层名称	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
鲜水河	142	90	0
	159.5	90	45
玉龙希	160	80	135
	205	80	135
抚边河	145	80	10
龙泉山	30	50	90
彭县—灌县	205	44	94
北川—映秀	205	33	142

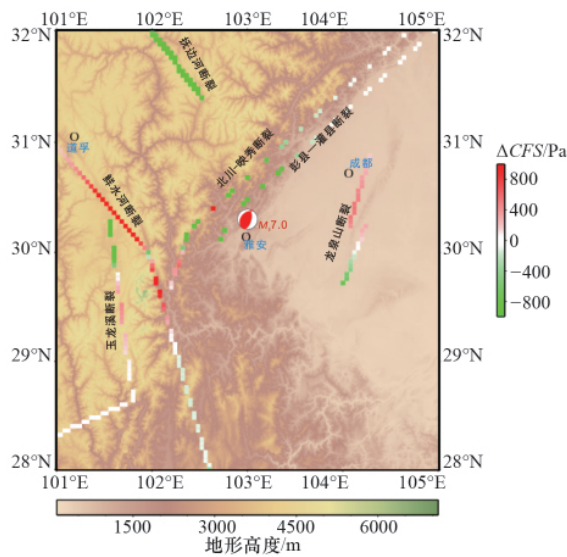


图 3 四川芦山地震对邻近断层库仑应力变化  
Fig. 3 Distribution of the changes of coulomb stress of each fault around Lushan earthquake area

### 3 结论

根据地震静态触发原理,本文应用弹性位错理论,在分层地壳模型和地震位错分布基础上,计算了四川芦山地震引起的同震应力变化,分析了对邻近主要活动断层的影响。计算结果表明:发震断层附近两端库仑应力增加,两侧远处减少,大部分余震分布在库仑应力增加的区域;鲜水河断裂带—康定段和玉龙希断裂南段危险性增加。但是本文采用的地震位错分布、断层形态、摩擦系数等参数较为简略,同时未考虑背景应力场,动态应力触发,流体作用等因素,也没有讨论黏弹性变形对今后库仑应力的影响,相关内容需继续深入研究。

致谢 韦生吉博士提供地震断层面位错分布。

#### 参考文献 (References)

[1] 石耀霖, 曹建玲. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以

汶川地震为例[J]. 地球物理学报, 2010, 53(1): 102-110.

Shi Yaolin, Cao Jianling. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(1): 102-110.

[2] 石耀霖. 关于应力触发和应力影概念在地震预报中应用的一些思考[J]. 地震, 2001, 21(3): 1-7.

Shi Yaolin. Earthquake, 2001, 21(3): 1-7.

[3] 腾吉文, 白登海, 杨辉, 等. 2008 汶川  $M_w$  8.0 地震发生的深层过程和动力学响应[J]. 地球物理学报, 2008, 51(5): 1385-1402.

Teng Jiwen, Bai Denghai, Yang Hui, et al. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(5): 1385-1402.

[4] 张培震. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, 38(9): 1041-1056.

Zhang Peizhen. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2008, 38(9): 1041-1056.

[5] 赵友年, 蒋良志, 魏继裕, 等. 雅安地区地震地质特征与地震活动性研究[J]. 四川地震, 1990(2): 1-48.

Zhao Younian, Jiang Liangzhi, Wei Jiyu, et al. Earthquake Research in Sichuan, 1990(2): 1-48.

[6] 秦向辉, 陈群策, 谭成轩, 等. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2870-2876.

Qin Xianghui, Chen Qunce, Tan Chengxuan, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2870-2876.

[7] 陈群策, 丰成君, 孟文, 等. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(12): 3923-3932.

Chen Qunce, Feng Chengjun, Mengwen, et al. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(12): 3923-3932.

[8] Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R. Fundamentals of rock mechanics[M]. Hoboken, New Jersey, USA: Wiley-Blackwell, 2009.

[9] Wang R, Lorenzo-Martín F, Roth F. 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, 2006, 32(4): 527-541.

[10] Wang R. A simple orthonormalization method for stable and efficient computation of Green's functions [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1999, 89(3): 733-741.

[11] 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2008 年 5 月 12 日  $M_w$  7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2009, 39(5): 537-545. Shan Bin, Xiong Xiong, Zheng Yong, et al. Science in China, Series D: Earth Sciences, 2009, 39(5): 537-545.

(责任编辑 刘志远)

#### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。