

文章编号: 1006-6616 (2008) 03-0193-08

[编者按] 本文根据汶川地震同震静态位移计算了周围地区一些断层的库仑应力变化, 并据此评价了震后周围地区断层和地震的活动性, 结果表明较大的余震分布与库仑应力增强区有较好的对应关系。从力学的角度深入解释了余震的发生机理, 对研究汶川大震后地震的发展趋势有重要意义, 值得一读。

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

王连捷, 周春景, 孙东生, 吴珍汉, 王 薇

(国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘要: 汶川“5.12”8.0 级特大地震, 造成重大人员伤亡和财产损失。地震对周围地区断层活动性的影响和余震发展方向是人们关心的一个问题。根据汶川地震同震静态位移我们计算了周围地区一些断层的库仑应力变化, 并据此评价了震后周围地区断层和地震的活动性。计算结果表明, 龙门山断裂带东北段, 包括北川、青川、宁强等地, 为库仑应力增强区, 有利于地震的发生。较大的余震分布与库仑应力增强区有较好的对应关系。鲜水河断裂带主要为库仑应力下降区, 只有一小段为增高区, 鲜水河断裂带总体上不利于地震活动。成都地区的西北部库仑应力增强, 东南部应力下降。库仑应力变化的研究对大震后地震趋势的分析有重要意义。

关键词: 汶川地震; 库仑应力变化; 龙门山断裂带; 有限元

中图分类号: P315.72⁺7

文献标识码: A

0 引言

2008 年 5 月 12 日四川汶川发生的特大地震, 特点是持续时间长, 破坏性强, 滑坡、泥石流、堰塞湖等次生灾害严重^[1]。地震发生在龙门山断裂带上。地震破裂开始于汶川映秀, 然后以每秒 2.8km 的速度沿断裂带向 NE 向扩展, 直到青川, 破裂长度约 300km。破裂持续时间约 100s。震源机制比较复杂, 在地震过程中震源机制随着时间和空间发生变化。在地震的开始阶段表现为逆冲为主, 但后来向 NE 方向逐渐转变为以走滑为主。这次大地震对周围

收稿日期: 2008-09-28

基金项目: 中国地质科学院基本科研业务费专项 (编号: Ywf060717) 经费资助; 地质力学所基本科研业务费 (编号: DZLXJK200705) 资助。

作者简介: 王连捷 (1933-), 男, 研究员, 从事地质灾害、地应力测量、应力场数值分析及应用研究。E-mail: wanglj01@sina.com

地区断层应力和地震活动有何影响,是人们关心的一个问题。为此,我们计算了这次大震后周边地区一些主要断层的库仑应力的变化,据此分析了该区地震的活动性。

1 库仑应力变化

近年来,大地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震活动影响的研究受到广泛关注^[2]。很小的静态库仑应力变化就可能对地震活动性、地震的时空分布产生较大的影响^[3~4]。许多震例表明,大地震后库仑应力的变化与后续地震活动有促进作用。大多数库仑破裂应力增加的地区地震活动速率增高;而库仑破裂应力减小的地区,地震活动减小^[5~8]。一些地区库仑破裂应力增加量大于0.01~0.03 MPa就有可能触发地震活动^[9~10],库仑破裂应力变化起触发作用的典型值是0.1~1 MPa^[11]。库仑应力对地震的触发作用有一个延迟时间。一般来说,延迟时间可为几秒到几十年^[2,9]。库仑应力的研究对地震危险性分析具有重要意义。

库仑破裂应力是作用在断层面上,克服摩擦阻力使断层滑动的力。库仑破裂应力的变化是指库仑破裂应力的改变量。

库仑破裂应力的变化 $\Delta\tau_c$ 的表达式如下^[12~14]:

$$\Delta\tau_c = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma) \quad (1)$$

式中, $\Delta\tau$ 为断层面滑动方向上的剪切应力的变化,剪切应力 $\Delta\tau$ 与断面滑动方向一致时定义库仑应力的变化为正值,否则为负值。 $\Delta\sigma$ 为断面上正应力的变化(拉伸应力为正值), μ 为内摩擦系数,参照文献[14],我们取 $\mu=0.4$ 。

根据大震后产生的断层的静态位移,计算出库仑应力的变化,增强或减弱,来分析地震活动性。

$\Delta\tau_c > 0$ 和 $\Delta\tau_c < 0$ 分别表示断面上被加载(库仑应力加大)或被卸载(库仑应力减小)的情况。 $\Delta\tau_c > 0$ 时,对地震活动有加强作用, $\Delta\tau_c < 0$ 时对地震活动有减弱作用。

2 有限元模型

采用大型有限元 ANSYS 软件^[19]进行断层静态位移引起的库仑应力的计算。模型的范围为东经 98.5°到东经 107.5°,北纬 27.5°到北纬 34°,深度为 40km。地质构造参考中国活动构造图^[17]经简化而成(图 1)。将龙门山断裂带看成不连续面,采用接触单元处理。其他断层看成连续介质,具有一定的宽度。断层带内的弹性模量低于周围介质的弹性模量,断层带以外为均匀介质。采用六面体八节点单元,共有单元 13010 个,结点 15046 个(图 2)。模型的四边分别为东西向和南北向约束,底部为沿深度方向约束。

3 汶川地震位错模型

由震源机制解得知汶川地震破裂面走向为 230°,倾向 320°,倾角 39°,滑动角 120°。由地震波反演得到了地震断层面的同震静态位移分布如图 3^①。可以看出沿断层面的静态位移

① 陈运泰,许力生,张勇,等. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告, 2008, www.cea-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况

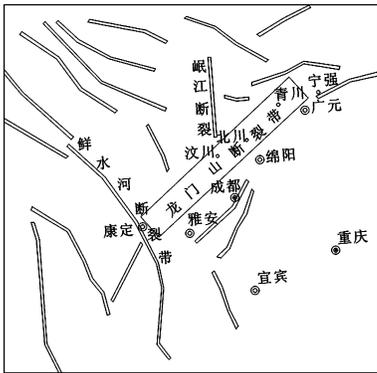


图1 简化的活动断裂分布

Fig 1 A sketch showing distribution of active faults

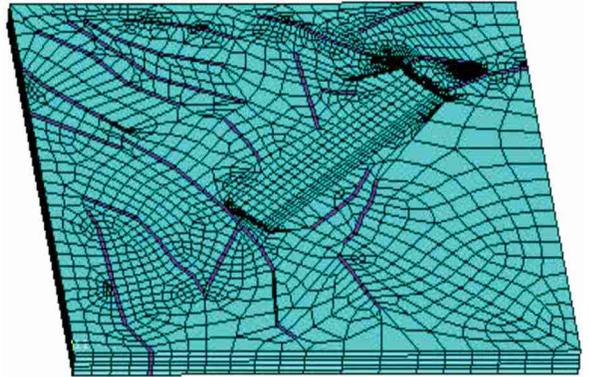
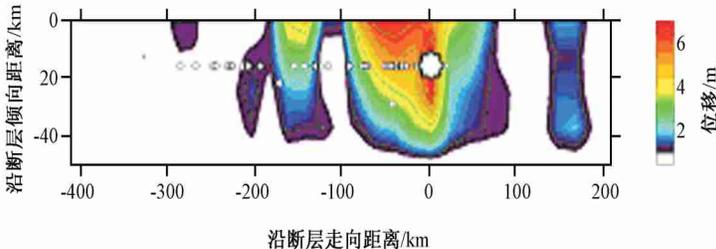


图2 有限元网格划分

Fig 2 Division of finite element mesh for calculation

约为 6.7m。最大静态位移在震中和震中的 NE 方向约 100km 范围内，其他地区位移量较小。根据该地震位错模型计算了区域上的位移分布和库仑应力的变化。

图3 地震位错模型 (沿断层面的位移)^①Fig 3 Model of displacement of Wenchuan earthquake^①

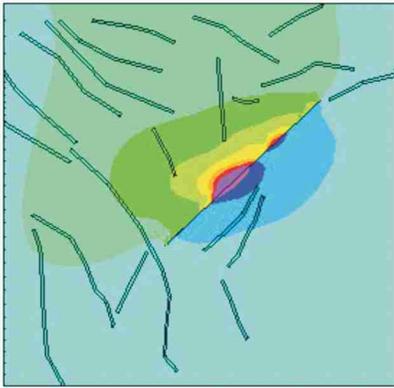
4 地震位错引起的地表位移

根据图3给出的地震位错模型，通过有限元计算得到的地表位移分布如图4到图6。图中给出了沿龙门山断裂带走向、垂直走向和铅直方向的位移分布。由沿断裂带走向的位移(图4)可以看出，断层两侧有一个右旋走滑扭动，相对错动量最大为 3.5m。位移影响的范围达数百公里。由垂直走向的位移(图5)可以看出，断层上盘(西侧)向 SE 方向位移，位移量最大为 4.5m，下盘向 NW 方向位移位移量最大为 1.5m，反映了断层的挤压特点。铅直方向位移(图6)表现为上盘向上位移，下盘向下位移，反映了逆冲断层的特性。

5 库仑应力的变化及地震活动性

由地震断层静态位移引起的应力，通过式(1)计算出断层的库仑应力变化。龙门山断层的产状，与断层位移模型使用的产状相同，为逆冲右旋走滑断层。其他断层没有产状资

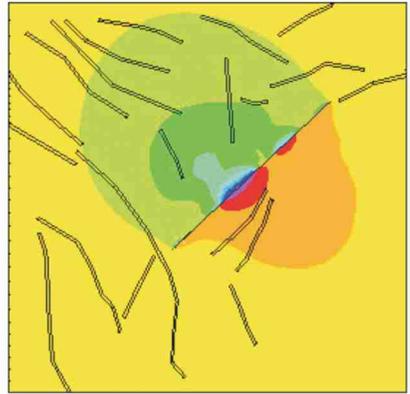
^① 陈运泰, 许力生, 张勇, 等. 2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告, 2008, www.cca-igp.ac.cn/汶川地震专题/地震情况



-1.00 -0.61 -0.22 .17 .56 .94 1.33 1.72 2.11 2.50/m

图4 沿断层走向的地表位移（正值表示沿断层向 NE 方向位移，负值表示沿断层向 SW 方向位移）

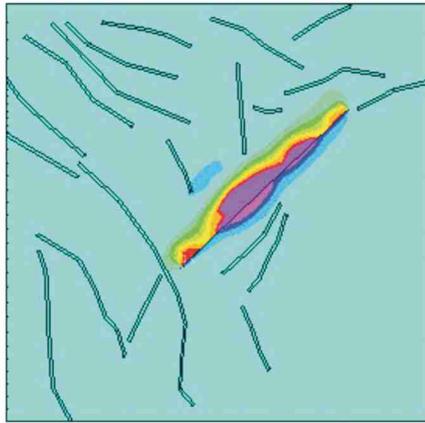
Fig.4 Surface displacement along strike of Longmenshan fault from Wenchuan earthquake (positive shows northeast displacement, negative shows southwest displacement)



-4.50 -3.82 -3.14 -2.47 -1.79 -1.11 -.43 .24 .92 1.60/m

图5 垂直断层走向的位移（正值表示垂直于断层向 NW 方向位移，负值表示垂直于断层向 SE 方向位移）

Fig.5 Surface Displacement perpendicular to strike of Longmenshan fault from Wenchuan earthquake (positive shows northwest displacement, negative shows southeast displacement)



-0.50 -0.31 -0.11 0 .28 .47 .67 .86 1.06 1.20/m

图6 垂向位移（正值表示向上，负值表示向下）

Fig.6 Vertical displacement from Wenchuan earthquake (positive shows displacement up, negative shows displacement down)

料，皆按近似直立的走滑断层处理。鲜水河断裂以及大部分 NW 向断裂按左旋走滑处理。NE 向断裂按右旋走滑处理。共计算了 28 个断层段，结果如图 7 和图 8。图 7 给出了库仑应力增加和降低的地区，图 8 给出了相应断层的应力增加或降低数值大小。图 7 中，黄色区域为库仑应力增加区，蓝色区域为库仑应力降低区，绿色区域为库仑应力变化不明显区域（变化量小于 0.01MPa）。库仑应力变化的情况如下：

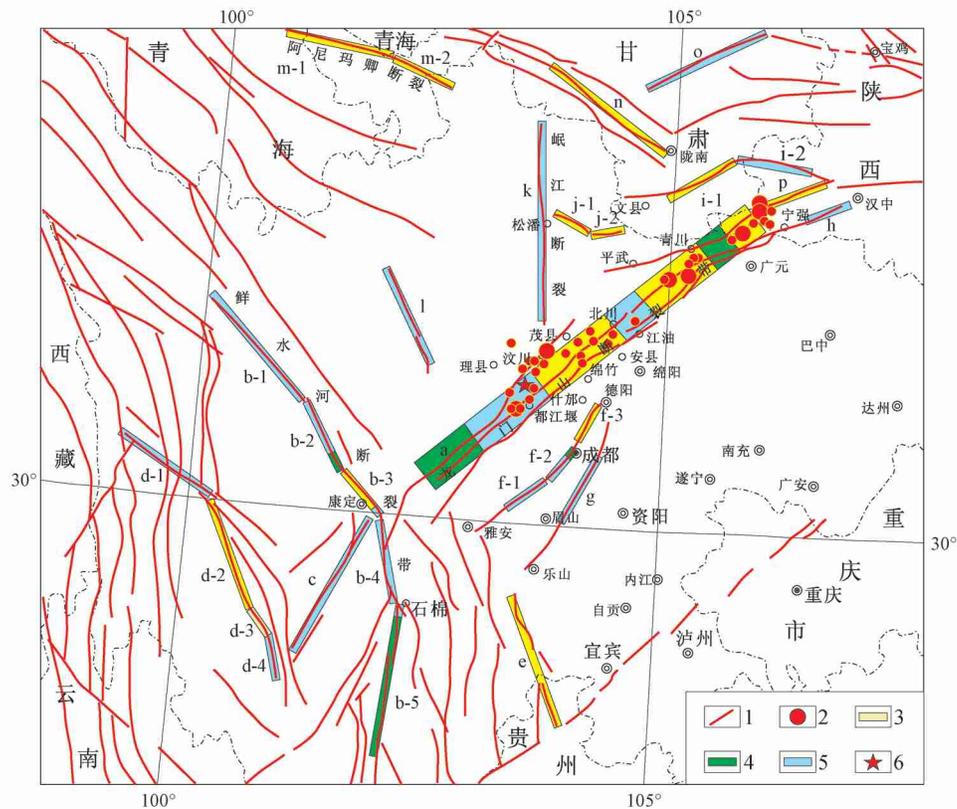


图 7 四川及其他地区库仑应力的变化和汶川地震后 5 级以上余震分布

Fig. 7 Coulomb stress changes and distribution of aftershocks (more than M5)

in Sichuan and other areas after the Wenchuan earthquake

- 1. 断层; 2. 5 级以上余震; 3. 库仑应力增加区; 4. 库仑应力变化不明显地区 (< 0.01 MPa);
- 5. 库仑应力降低区; 6. 震中

沿龙门山断层的库仑应力分布是不均匀的, 大部分为库仑应力增加区 (图 7), 增加的幅度较大, 为 0.25 ~ 1.7 MPa (图 8), 少部分为降低区, 但降低幅度不大, 最大降低幅度为 -0.3 MPa。余震, 特别是 5 级以上较大余震的分布, 与龙门山断层及附近断层的库仑应力增加区有较好的对应关系。北川、青川、宁强、平武等地皆为库仑应力增加区, 这些地区都有较强余震。甘肃陇南地区和阿尼玛卿断裂为应力增加区, 应注意这些地区的强余震。

鲜水河断裂北段和南段为库仑应力下降区或应力变化不明显区。只有中部一小段约 60km 为升高区, 升高幅度为 0.04 ~ 0.17 MPa。故鲜水河断裂带上大部分地区为卸载区, 不利于地震活动, 但局部应力增加地段, 应注意地震活动的可能性。

成都至德阳地段, 为库仑应力增加区。成都西南地区断层为库仑应力降低区。从余震看, 成都西北有余震, 而东南没有。

总体上来看, 由震中区向 NE 方向延伸直到青川、宁强、陇南一带为应力增强区, 5 级以上强余震分布较多, 应加强监视。震中区西南方向主要为应力下降区, 小部分为增强区, 但幅度与东北部相比相对较小。

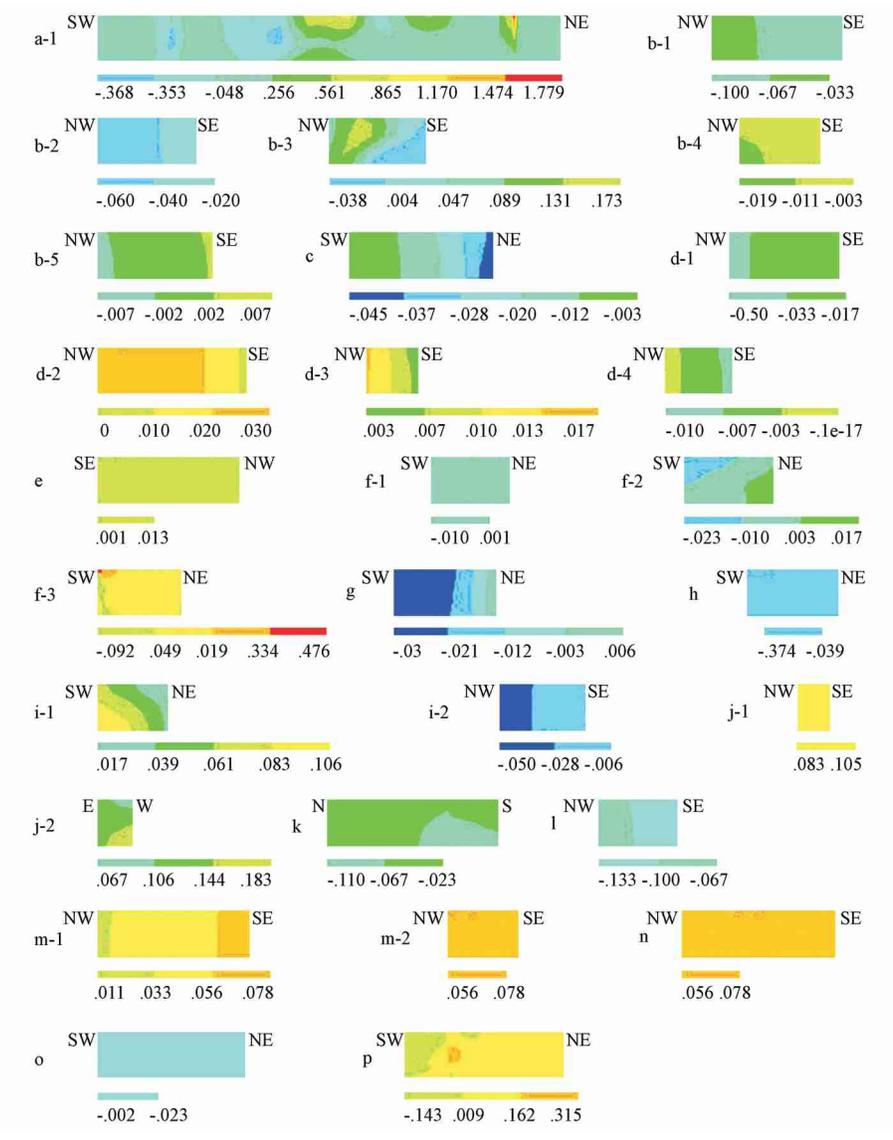


图8 沿断层面库仑应力变化的分布 (库仑应力变化单位 MPa)
 Fig.8 Distribution of Coulomb stress changes along fault plane after Wenchuan earthquake

6 结论

- (1) 沿龙门山断裂带大部分为库仑应力增加区。较大余震的分布与库仑应力增加区有较好的对应关系。北川、青川、宁强一带为应力增加区 (大于 0.25 ~ 1.5MPa)，5 级以上余震多分布于此。余震主要向 NE 方向发展。
- (2) 鲜水河断裂带北段为库仑应力下降区，南段应力变化不明显区。只有中部一小段 (约 60km) 为升高区，升高幅度较小，为 0.04 ~ 0.17MPa。库仑应力变化对鲜水河断裂带上大部分地区地震活动不利，只在局部应力增加地段，对地震有触发作用。
- (3) 甘肃陇南地区和阿尼玛卿断裂为库仑应力增加区。成都至德阳段断裂为库仑应力增

加区, 成都东南为库仑应力降低区。

(4) 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, 能否发生地震还取决于区域应力状态及其变化情况。虽然如此, 库仑应力的变化对大震后地震的趋势和余震的分析仍有重要意义。

致谢: 本工作得到中国地质科学院赵文津院士的指导, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 张永双, 雷伟志, 石菊松, 等. 四川5.12地震次生地质灾害的基本特征初析 [J]. 地质力学学报, 2008, 14 (2): 109~116.
- [2] Harris R A. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. Geophys Res, 1998, 103: 24347~24358.
- [3] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering [J]. Geophys J Int, 1997, 128: 594~604.
- [4] Deng J, Sykes L R. Evolution of the stress field in southern California and triggering of moderate-size earthquakes: A 2002 year perspective [J]. J Geophys Res, 1997, 102: 9859~9886.
- [5] Reasenber P A, Simpson R W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake [J]. Science, 1992, 255: 1687~1690.
- [6] Hardebeck J L, Nazareth J J, Hauksson E. The static stress change triggering model: Constraints from two southern California aftershock sequences [J]. J Geophys Res, 1998, 98: 4461~4472.
- [7] Toda S. Stress transferred by the 1995 $M_w=6.9$ Kobe, Japan, shock: Effect on aftershocks and future earthquake probabilities [J]. J Geophys Res, 1998, 103: 24543~24565.
- [8] 刘桂萍, 傅征祥. 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, 2002, 18 (2): 175~182.
- [9] Parsons T. Global Omori law decay of triggered earthquakes: Large aftershocks outside the classical aftershock zone [J]. Geophys Res, 2002, 107: doi: 10.1029/2001JB000646.
- [10] King G C B, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. Bull Seism Soc Amer, 1994, 84: 935~953.
- [11] Stein R S, Barka A A, Dieterich J H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake static stress triggering [J]. Geophys J Int, 1997, 128: 594~604.
- [12] Okada Y. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space [J]. Bull Seism Soc Amer, 1992, 82: 1018~1040.
- [13] 王琼, 聂晓红, 唐丽华. 北天山西段中强地震应力触发作用初步研究 [J]. 内陆地震, 2007, 21 (2): 119~128.
- [14] 郝平, 傅征祥, 田勤俭, 等. 昆仑山口西8.1级地震强余震库仑破裂应力触发研究 [J]. 地震学报, 2004, 26 (1): 30~37.
- [15] 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响 [J]. 地震学报, 2007, 29 (2): 116~129.
- [16] 叶裕明, 刘春山, 沈火明, 等. ANSYS 土木工程应用 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2005.
- [17] 邓起东, 冉勇康, 杨晓平, 等. 中国活动构造图 [M]. 北京: 中国地震出版社, 2007.

COULOMB STRESS CHANGES CAUSED BY WENCHUAN EARTHQUAKE AND ITS INFLUENCE ON SEISMIC ACTIVITY IN THE ADJACENT AREAS

WANG Lian-jie, ZHOU Chun-jing, SUN Dong-sheng, WU Zhen-han, WANG Wei
(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: On 12 May 2008, M8.0 Wenchuan earthquake occurred along the Longmenshan fault belt in Sichuan Province of China, causing enormous losses and thousands death, and the rearrangement of crustal stress commonly leads to damaging aftershocks. Coulomb stress changes caused by the Wenchuan earthquake are calculated and earthquake activity is evaluated using finite element method for some faults around the area. Results show that Coulomb stress displays a greater changes in northeast part of Longmeshan fault belt, including Beiduan, Qingchuan, Ningqiang areas and so on. Most of aftershocks of Wenchuan earthquake occurred in the area where the Coulomb stress change is increased. Coulomb stress gets weaker in most parts of Xianshueihe fault (b-1, b-2, b-4) except for some parts (b-3). It shows an increase to northwest of Chengdu, but a decrease to southeast of Chengdu. Coulomb stress increases can bring faults to failure, with delays ranging from seconds to decades.

Key words: Wenchuan earthquake; Coulomb stress change; Longmershan fault; finite element

中国地质科学院代表团参加第 33 届国际地质大会收获丰硕

第三十三届国际地质大会于 2008 年 8 月 6 日~14 日在挪威首都奥斯陆成功举行, 来自 113 个国家的 6300 多名代表出席了此次地球科学界的“奥林匹克”盛会。中国共有 376 名代表参会。大会期间, 共举办了 350 个学术研讨会、96 个工作会、20 个专题研讨会和短期讲座, 80 个单位参加了大会科技展览会, 664 名代表参加了 35 条会前或会后地质考察路线。

以李廷栋院士为团长、董树文副院长为副团长的中国地质科学院代表团一行 82 人参会, 共提交论文摘要 83 篇, 口头发言论文 52 篇, 展讲论文 31 篇。共参加了 36 个专题研讨会, 35 名代表分别于会前、会后参加了 10 条路线的野外地质考察。

大会期间, 汶川地震成为热点, 董树文副院长应邀在大会“每日专题”会上作了“汶川地震灾情与中国地质科学家反应”报告; 地质力学所张岳桥研究员在国际岩石圈研究专题会上作汶川地震学术报告, 公布了第一手资料; 许志琴院士作了汶川地震科学钻探计划的报告, 深受好评。我院与中国地质学会共同筹办的中国地质代表团展台, 受到广泛关注。

中国地质科学院国际合作处供稿



映秀地震断裂上盘地震滑坡 位于映秀地震断裂上盘的汶川县映秀镇, 陡峻的岷江东岸在主震的诱发下产生地震滑坡, 掩埋了都汶公路, 造成高架桥严重损毁 5月19日杨农摄



被山上滚石砸后的汽车
5月19日雷伟志摄于映秀镇



地震造成湔江大桥垮塌, 左岸产生裂缝宽达0.5米 5月18日张永双摄



安县雎水堰塞湖
5月18日张永双摄



国土资源部地科院考察组在青川关庄镇东河口调查滑坡造成堰塞情况
5月20日雷伟志摄



安县雎水镇崩塌滑坡损坏公路
5月18日雷伟志摄



汶川县映秀镇一街道现状
5月19日施炜拍摄



经过处置后的青川关庄镇东河口堰塞湖
6月8日雷伟志摄



北川县城地震断裂造成的地表变形
5月18日雷伟志摄



地科院考察组对活动断裂地表变形进行野外测量
5月18日杨农摄影



北川县任家坪北川地震断裂的地表缩短现象
5月18日杨农摄影



汶川县映秀镇地震断裂上的地震鼓包
5月19日杨农摄影



汶川县映秀镇地震断裂上的拱曲形变
5月19日杨农摄影



地科院考察组在组长董树文副院长带领下测量映秀镇地震破裂
5月19日雷伟志摄



地质力学所第二批专家组在北川擂鼓镇考察被地震造成的地表裂缝
6月4日雷伟志摄



汶川县漩口岷江河漫滩沿地震断裂产生沙土液化现象
5月19日张永双摄