

王凯英,马胜利. 2008 年汶川地震的破裂模型及引起的余震活动分析. 地球物理学报, 2011, **54**(6): 1511~1516, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.010

Wang K Y, Ma S L. Analysis of co-seismic rupture models for 2008 Wenchuan earthquake and relations with aftershock. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(6): 1511~1516, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.010

2008 年汶川地震的破裂模型及引起的余震活动分析

王凯英,马胜利

地震动力学国家重点实验室 中国地震局地质研究所,北京 100029

摘 要 用两种发震构造的破裂位移分布模型对 2008 年汶川地震造成的区域主要断裂的库仑应力变化进行了模拟. 通过对这两种破裂位移模型模拟结果的对比分析,表明破裂位移模型的逆冲兼右旋滑动的位移模式及南北两段分别有两个滑动量高值区这样的特点控制了区域库仑应力变化的总体分布特征. 汶川地震的余震分布和计算结果还显示:所获得的区域主要断裂的库仑应力变化分布和正应力变化分布同时控制了该地震发生后余震的分布,库仑应力变化增强同时断层面受到主震断层位错拉张的区域和余震的分布强烈吻合,而库仑应力变化增强但是相应部位断层面受到主震的挤压作用却没有余震发生,显示了强震后区域断层受到的正应力变化和库仑应力变化均对余震的发生起到了重要作用,而不仅仅是库仑应力变化增强是触发余震的机制;两种模型计算结果的细微差异显示了倾角向下变缓的震源破裂模型能更好地解释余震在破裂断层北部的分布特点. 对昆仑山断裂、鲜水河断裂等周边强震多发断层的库仑应力变化及对未来地震活动的可能影响进行了初步评价.

关键词 汶川地震,破裂模型,库仑应力变化,正应力变化,地震触发

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.06.010 中图分类号 P315, P541 收稿日期 2010-04-06, 2011-05-24 收修定稿

Analysis of co-seismic rupture models for 2008 Wenchuan earthquake and relations with aftershock

WANG Kai-Ying, MA Sheng-Li

State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract Two co-seismic displacement models were used to simulate the Coulomb stress change caused by the 2008 Wenchuan earthquake. Simulating results of these two models indicate that the common characteristics of the rupture faults with thrust and right lateral displacement and two respective areas in northern and southern part with high slipping values control the Coulomb stress change distribution. Comparing the aftershock distribution of Wenchuan earthquake and simulating results, we discover that not only the Coulomb stress change distribution influences the aftershock distribution, but also the normal stress change distribution must be paid much attention to, i. e. those faults with Coulomb stress increasing and normal stress decreasing are to a large degree consistent with aftershock distribution, while those faults with Coulomb stress increasing and normal stress increasing almost have no aftershocks. Other unapparent differences between two simulating results indicate that the model with a rupture fault steep in shallow part and gentle in deep part can better explain the aftershock distribution, especially in the northern area of the whole seismic belt. Coulomb stress changes in some faults where strong earthquakes

often occur, such as Kunlun fault and Xianshuihe fault, are analyzed to tentatively evaluate the likely influence on future seismicity of these areas.

Keywords Wenchuan earthquake, Rupture model, Coulomb stress change, Normal stress change, Earthquake triggering

1 引言

2008年5月12日,青藏高原东缘龙门山断裂带发生了 $M_s 8.0$ 的强烈地震并引起了巨大的地震灾害.地震矩张量反演及震后野外考察显示,汶川大地震造成了长约240 km的地表破裂,在其发震断层上产生了最大可能超过10 m以上的同震位移,在地表被确认的最大同震位移达到了5 m以上^[1,2].如此强烈的地震发生后对其引起的区域其他断层应力变化的分析不仅对余震发生趋势的判断有现实意义,对区域未来的地震危险性评估也有重要价值.

在计算地震造成的应力变化时,需要确定地震破裂面的几何形态和破裂面的滑动分布.汶川地震发生后,国内外研究人员反演给出了汶川地震震源破裂模型^[2~4],这些结果在细节上略有差别,但显示了破裂面共同特征:破裂面总体方位及破裂长度是近似的,破裂面逆冲兼右旋走滑错动,南北两段有两个错动高值区等.在此基础上,Parsons等^[5]和Toda等^[6]较早运用Ji C^[2]公布的震源破裂模型对这次地震的同震库仑应力变化进行了研究.随着震后现场考察及其他研究工作的深入和各方面资料的进一步丰富,对区域断层性质也有了更加细致的了解,在此基础上国内一些学者运用了类似的平面或分段平面破裂模型也进一步探讨了汶川地震造成的库仑应力变化对周围断层的影响^[7,8].然而人工地震剖面^[9]显示从青藏高原东缘跨过龙门山断裂到四川盆地,地壳界面起伏较大,显示为一较陡的斜坡带,地壳厚度从60~62 km降至42~44 km;地质学研究^[10]表明构成龙门山断裂带的三条主要断层呈铲式叠瓦状向四川盆地推覆,地表出露处断层的倾角较高($60^\circ \sim 70^\circ$),沿北西方向断层倾角随着深度增加而变缓;汶川主震的震源机制解也显示出震源深度的断层为低倾角.这些都表明汶川地震的震源破裂面是非常复杂的,从地表到深部断层面的倾角是变化的.王卫民等^[11]利用远场体波波形记录结合近场同震位移数据,根据人工地震剖面资料、地质资料和地震地表破裂行迹,构造了主破裂断层面倾角向下变缓的逆断层模型并重建了地震的破裂过程.

上述两类不同的震源破裂模型对库仑应力计算结果会造成什么差异?弄清楚这一点将有益于我们应用库仑应力变化结果去分析判断强震对区域地震活动的影响.本文使用Ji C.和王卫民给的模型进行对比研究以讨论不同模型对库仑应力造成的影响,以此分析引起余震活动的力学机理.

强震发生后对区域其他断层会造成正应力和剪应力的变化,特定断层上的库仑应力变化(ΔCFS)表示为:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu_f \Delta\sigma_n,$$

式中 μ_f 为断层的静摩擦系数, $\Delta\tau$ 为所研究区域内各接收断层面上剪切应力的变化, $\Delta\sigma_n$ 为断层面上有效正应力的变化(遵循弹性力学定义,拉张应力为正).可以看出,不仅震源破裂模型会造成所计算的库仑应力分布的差异,接收断层的位置、走向、倾角等也会对库仑应力计算结果产生影响,本文所获得的区域各主要断层面的库仑应力分布是按接收断层的实际走向、倾角与滑动角分别投影计算得到的,能够比较真实地反映实际断层的产状和活动性质对地震断层位错的应力响应.

2 模型概况

计算模型中的断层主要包括:震区附近构成龙门山推覆构造带的三条主要断裂:前山灌县—江油断裂、江油—广元断裂等,中央北川—映秀断裂、茶坝—林庵寺断裂等以及后山汶川—茂县断裂和青川断裂等.参考根据地震勘探剖面、震后地表破裂带分布、地质资料及余震重新定位结果所构建的龙门山推覆构造带中段发震断层的几何结构模型^[1],将计算模型中的震源破裂面设定为中央北川—映秀断裂,其他断层为计算库仑应力的接收断层.震区附近这三组断层设为倾向北西,运动性质为逆冲兼右旋走滑.考虑到鲜水河断裂、安宁河断裂以及昆仑山断裂等为强震多发带以及汶川地震可能造成的应力影响,在模型中也将其设为接收断层进行了计算.模型中断层的底边界深度约为30 km.计算模型假定为半无限空间弹性介质,杨氏模量设为80 GPa,泊松比0.25,岩石密度取 2500 kg/m^3 .模型中参与计算

表 1 模型中主要活动断裂参数

Table 1 Parameters of major active faults in models

断层名称	走向/(°)	倾角/(°)	滑动性质
茂县—汶川断裂	140 118 130	70	右旋逆冲
青川断裂	260 142 155	65	右旋走滑
灌县—江油断裂	125 136	65	逆冲—右旋逆冲
江油—广元断裂	150 140	65	右旋逆冲
茶坝—林庵寺断裂	155	55	右旋走滑
鲜水河断裂	317	80	左旋走滑
安宁河断裂	94	80	左旋走滑
昆仑断裂	299	75	左旋走滑

边界深度。

为比较断层摩擦系数对库仑应力变化的影响,本文对两种地震破裂模型中的断层摩擦系数 μ_t 各取 0、0.5 和 0.8 几种情况分别进行了计算. 从计算结果可以看出,摩擦系数取不同的值不仅影响库仑应力变化值的大小,在某些部位也会导致正负库仑应力的转变,如对后山的茂—汶断裂影响很显著. 对结果的详细分析是基于摩擦系数取 0.5 的情形.

3 计算结果及分析

由于发震断层的位移分布非常复杂,龙门山地区的断层具有复杂的逆冲兼走滑的运动特征,模型中其他接收断层,如鲜水河断裂、安宁河断裂及昆仑山断裂等具有各自不同的产状及运动方式,因此和将震源断层视为纯走滑或倾滑的位移模式以及不考虑接收断层各自不同的产状和运动方式,或接收断层相对简单的模型的库仑应力计算结果相比,本文获得的库仑应力变化分布呈现出非常复杂的特点. 但通过对比分析两种模型的结果,可以看出二者所显示的共性及各自的特点.

3.1 两种断层位移模型的计算结果显示出很强的一致性

两种模型获得的模拟结果总体上看是相似的,尤其是距离发震断层较远的那些接收断层,如昆仑断裂、鲜水河断裂等,所显示的库仑应力变化非常一致;在发震断层附近,二者也都显示出对前山的灌县—江油断裂有很强的应力加载,与野外调查得到的前山断裂有地震地表破裂的结果^[1]及反演得到的前山断裂在中央断裂开始破裂 7.2 s 后开始错动^[11]的结果是相符的. 后山的汶川—茂县断层有显著的余震活动,计算结果也显示主震断层北川—映秀断裂的破裂在汶川—茂县断裂西南段造成很强的库仑应力加载(图 2). 来自两种不同模型所获得的库仑应力结果所显示的高度一致性表明了所使用的两种震源破裂断层模型的逆冲兼右滑的位移模式及南北两段分别有两个滑动量高值区这样的特点控制了区域库仑应力变化分布的总体格局.

计算结果显示了另一个非常值得关注的特点:所获得的区域主要断裂的库仑应力变化分布和正应力变化分布(图 3)同时控制了余震的分布,库仑应力变化增强,同时断层面受到拉张应力的区域和余震的分布强烈吻合,如后山的茂—汶断裂南段有较多余震,而本文计算结果也显示相应部位断层的库仑

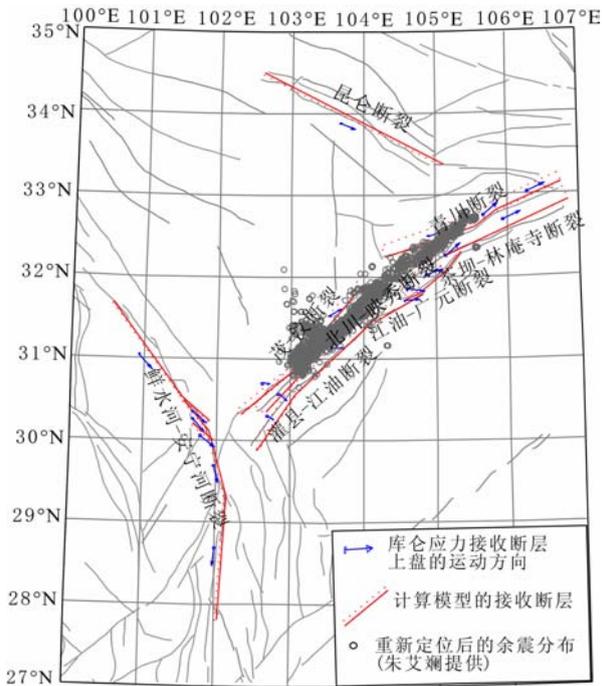


图 1 汶川地震区域构造、余震分布(朱艾斓提供)及库仑应力计算模型中的主要接收断层

Fig. 1 Regional tectonics, aftershock distribution (supported by Zhu Ailan) and main receiver faults of Coulomb stress calculating model for Wenchuan earthquake

的断层的空间分布如图 1 所示,具体的基本参数见表 1.

传统的库仑应力计算方法多不考虑背景构造应力场,而已有研究表明库仑应力变化中的剪切应力变化分量与初始应力状态有关,是否考虑背景应力会造成断层两端的库仑应力分布显著的差异^[12]. 因此本文模型计算中考虑了区域背景应力场,参考本区域现今应力场的研究^[13],假设模型受水平最大主压应力轴南东东向 120° 挤压,参考实测结果的量级^[14]应力场在近地表取值 10 MPa. 载荷随深度的变化考虑了岩石重力因素随深度线性增加至断层底

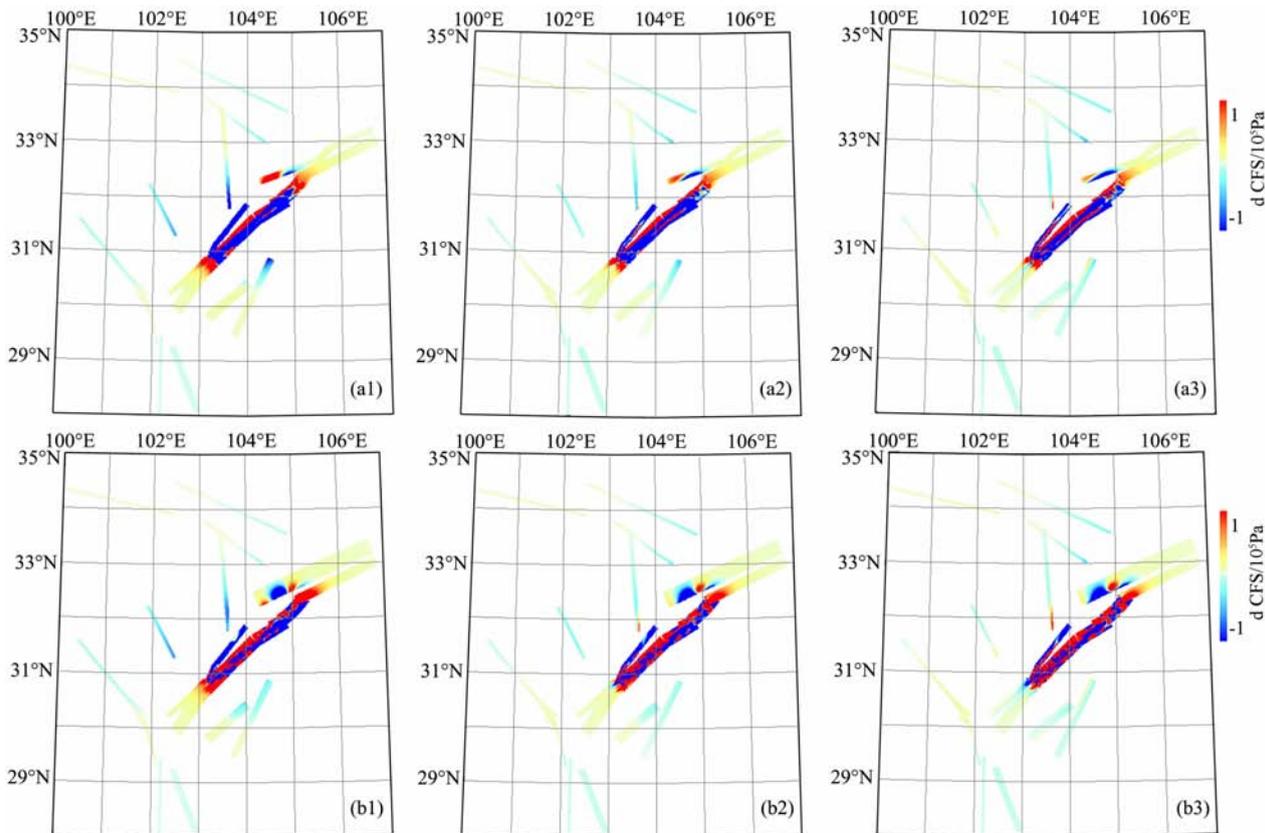


图 2 汶川地震主震断层滑动在周围主要断层上引起的库仑应力变化

(a)用 Ji C (2008)^[2]的断层位移模型的模拟结果;(b)用王卫民等(2008)^[11]的断层位移模型模拟结果;

下标 1,2,3 分别为摩擦系数 μ_f 设为 0,0.5 和 0.8 时的计算结果。

Fig. 2 Coulomb stress change of regional main faults caused by fault displacement of Wenchuan earthquake

(a) Simulating result of inverted fault displacement model model from Ji C (2008)^[2];

(b) Simulating result of inverted fault displacement model from Wang W (2008)^[11];

The simulating results for subscript 1,2,3 respectively correspond to the supposed frictional coefficient μ_f as 0, 0.5, 0.8.

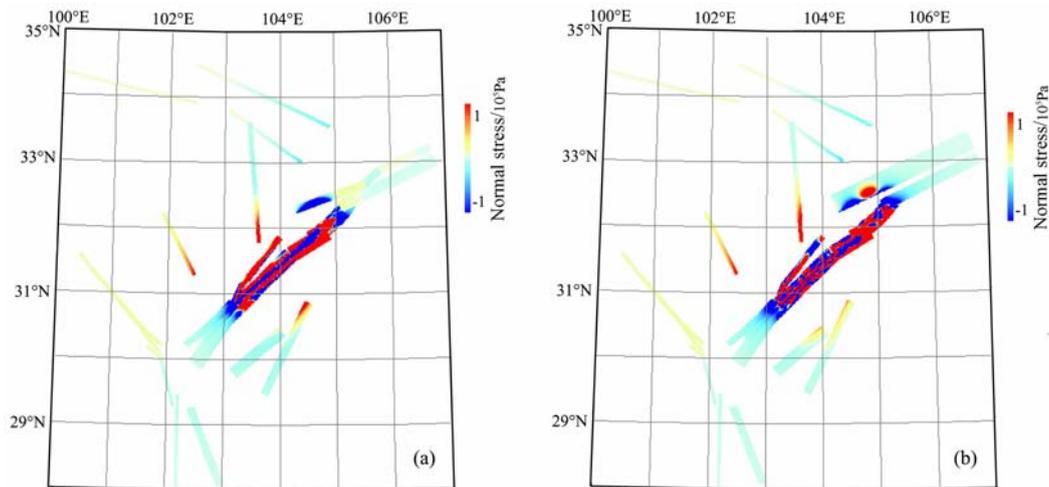


图 3 断层摩擦系数 μ_f 设为 0.5 时汶川地震主震断层滑动在周围主要断层上引起的正应力变化(拉张为正)

(a) 用 Ji C^[2]的断层位移模型的模拟结果;(b) 用王卫民等^[11]的断层位移模型模拟结果。

Fig. 3 Normal stress change of surrounding faults caused by fault slip of the Wenchuan main shock when μ_f is assumed as 0.5(extension is plus)

(a) Simulating result of inverted fault displacement model from Ji C^[2];

(b) Simulating result of inverted fault displacement model from Wang W^[11].

应力增强,同时断层面被拉张;而库仑应力变化增强,但是受到主震断层位错挤压作用的断层却没有余震发生,如紧邻发震断层的南北两侧部位库仑应力有很强的增强,震后人们一直关注是否会被触发较大余震,然而连较小的余震也几乎没有发生过.本文计算结果可以看出强震后区域断层受到的正应力变化和库仑应力变化均对余震的发生起到了重要作用,而不仅仅是库仑应力变化增强是触发余震的机制.

3.2 两种模型计算结果存在的差异

龙门山断裂的中段映秀—北川断裂往北东延伸在南坝附近(江油广元交界处)向东拐折,偏转到茶坝—林庵寺断裂,而汶川地震序列呈北东向准线性分布,说明南坝以北至少有部分余震发生在青川断裂,并且震后考察获得的结果^[1]显示地表破裂分布沿映秀—北川断裂向北东方向延伸,在南坝附近无偏转,尤其是在青川断裂发生了三个 6 级以上的强余震.对比两种模型的计算结果来看,用倾角向下变缓的逆断层位移模型^[11]计算得到的结果显示青川断裂相应部位有较强的库仑应力增强和断层面拉张作用,是非常有利于触发余震的地点;而平面震源断层模型中青川断裂的相应部位显示出负的库仑应力变化,不利于余震的触发.因此从这个意义上来说,倾角向下变缓的断层模型能够更完整地解析余震触发特别是地震破裂北段的余震触发的应力背景,而且也同样说明了正应力变化和库仑应力变化对是否触发余震均有重要作用.

4 讨论与结论

库仑应力变化作为判断未来地震被触发或抑制的重要标准,虽然有很多的震例表明大震产生的库仑破裂应力的增加明显有利于后续中强地震的发生,但是对于那些不符合正库仑应力促震或负库仑应力减震的情形,多数研究者试图从动态库仑应力变化或从断层的速率状态依赖性改变等角度去分析.而从本文针对汶川震例的研究看来,强震引起的区域断层面正应力的改变对区域地震活动性的影响也不容忽视:汶川地震所触发的余震分布不仅和库仑应力增强显著相关,同时受强震对区域断层面的正应力扰动所强烈控制,即库仑应力明显增强且断层面受到拉张的那些断层部位控制了余震的分布;震后引起人们强烈关注的南北两端库仑应力虽然显著增强,但同时断层面的正应力呈负的显著增强,即断层面受到了较强挤压,因此也鲜有余震发生.有关应

力扰动的实验结果^[15,16]显示:正应力扰动对摩擦滑动的影响比剪应力扰动的影响更显著.这意味着在考虑大震对区域应力场的影响时,不仅应注意库仑应力变化、而且应分析正应力变化对未来地震活动的影响.结合这两方面推断,汶川地震发生后,北部断层如茶坝—林庵寺断裂等以及龙门山南段虽然库仑应力显著增强了,同时断层面的压应力也得到增强,强震产生这样的应力作用抑制了这些断层余震的发生,同时也增加了这些断层未来发生较强地震的可能性.

鲜水河断裂、安宁河断裂等以及昆仑山断裂是强震非常活跃的地带,汶川地震的发生对这些断层的应力影响也引人关注.两种断层位移模型的计算结果均显示:从鲜水河断裂至安宁河断裂,仅在和龙门山断裂带交汇附近的有限段落,如鲜水河南段的库仑应力有比较微弱的增强,相应部位正应力变化显示微弱拉张(均 ≤ 0.01 MPa),其他部位显示库仑应力减弱;昆仑山断裂在靠近龙门山断裂附近显示库仑应力减弱,距离稍远则显示库仑应力增强,但非常微弱.因此,汶川地震对昆仑山断裂带及鲜水河断裂带等造成的静库仑应力变化不足以对这些断裂带的地震活动性造成显著影响.

致 谢 感谢日本产业技术综合研究所雷兴林研究员允许并指导使用其开发的相关计算软件,感谢中国科学院地质与地球物理研究所王卫民研究员为本研究提供数据,感谢审稿人提出的合理化建议.

参考文献(References)

- [1] Xu X W, Wen X Z, Yu G H, et al. Coseismic reverse- and oblique-slip surface faulting generated by the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake, China. *Geology*, 2009, **37**(6):515~518
- [2] Ji C, Hayes G. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w 7.9$ Eastern Sichuan, China Earthquake, 2008, http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php [2010-05-06]
- [3] Nishimura N, Yagi Y. Rupture process for May 12, 2008 Sichuan earthquake (preliminary result) [EB/OL], 2008, [2008-10-20] <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~nismura/20080512/>
- [4] Sladen A. Preliminary result 05/12/2008 ($M_w 7.9$), East Sichuan [EB/OL], 2008, [2008-10-20] http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/2008_e_sichuan/e_sichuan.html
- [5] Parsons T, Ji C, Eric Kirby. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, **454**:509~510

- [6] Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *J. Geophys. Res.* 2008, **35**, L17305, doi:10.1029/2008GL034903
- [7] 万永革,沈正康,盛书中等. 2008年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, 2009, **31**(2):128~139
Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, **31**(2):128~139
- [8] 单斌,熊熊,郑勇等. 2008年5月12日 $M_w7.9$ 汶川地震导致的周边断层应力变化. 中国科学(D辑), 2009, **39**(5):537~545
Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. Stress changes on major faults caused by $M_w7.9$ Wenchuan earthquake, May 12, 2008. *Sci China Ser D-Earth Sci* (in Chinese), 2009, **52**(5):593~601
- [9] 朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2008, **35**(4):348~356
Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2008, **35**(4):348~356
- [10] 周荣军,李勇, Alexander L等. 青藏高原东缘活动构造. 矿物岩石, 2006, **26**(2):40~51
Zhou R J, Li Y, Alexander L, et al. Active tectonics of the eastern margin of the Tibet plateau. *J. Mineral Petrol* (in Chinese), 2006, **26**(2):40~51
- [11] 王卫民,赵连锋,李娟等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 2008, **51**(5):1403~1410
Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. Rupture process of the $M_s8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5):1403~1410
- [12] 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. 地球物理学报, 2010, **53**(1):102~110
Shi Y L, Cao J L. Some aspects in static stress change calculation——case study on Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, **53**(1):102~110
- [13] 许忠淮,汪素云,黄雨蕊等. 由大量的地震资料推断的我国大陆构造应力场. 地球物理学报, 1989, **32**(6):636~646
Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. The tectonic stress field of Chinese continent deduced from a great number of earthquakes. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1989, **32**(6):636~646
- [14] 郭啟良,王成虎,马洪生等. 汶川 $M_s8.0$ 级大震前后的水压致裂原地应力测量. 地球物理学报, 2009, **52**(5):1395~1401
Guo Q L, Wang C H, Ma H S, et al. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan $M_s8.0$ earthquake of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5):1395~1401
- [15] 崔永权,马胜利,刘力强. 侧向应力扰动对断层摩擦影响的实验研究. 地震地质, 2005, **27**(4):645~652
Cui Y Q, Ma S L, Liu L Q. Effect of lateral stress perturbation on frictional behavior: an experimental study. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2005, **27**(4):645~652
- [16] 黄元敏,马胜利,缪阿丽等. 剪切载荷扰动对断层摩擦影响的实验研究. 地震地质, 2009, **31**(2):276~286
Huang Y M, Ma S L, Miao A L, et al. Effect of shear loading perturbation on frictional behavior: an experimental study. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, **31**(2):276~286

(本文编辑 胡素芳)