

万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫. 2009. 2008年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, 31(2): 128-139.
Wan Yongge, Shen Zhengkang, Sheng Shuzhong, Xu Xiaofeng. 2009. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 128-139.

2008年汶川大地震对周围断层的影响^{*}

万永革^{1,2,*} 沈正康³⁾ 盛书中¹⁾ 徐晓枫⁴⁾

- 1) 中国河北三河燕郊 065201 防灾科技学院
2) 中国北京 100029 中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室
3) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院地球物理系
4) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

摘要 2008年5月12日的汶川地震明显地改变了区域地震的应力场. 理解这种应力场的改变对周围断层构造加载进程和区域地震危险性的改变非常重要. 本文以汶川地震的破裂为驱动源, 计算了该地震造成周围断层上的静态库仑破裂应力变化. 结果表明, 汶川大地震的发生使得龙门山断裂北部和最南端、鲜水河断裂最南端、东昆仑断裂、陇县—宝鸡断裂、鄂拉山断裂、白玉断裂、日月山断裂南端、马边—盐津断裂南部、班公错—嘉黎断裂西部、则木河断裂的库仑破裂应力增加, 量值达0.00001—0.06 MPa. 库仑破裂应力增加尤为显著的断裂量值分别为: 龙门山断裂的地震断层南端最大增加0.01 MPa、北端0.03 MPa, 秦岭南缘断裂的西南部最大增加0.03 MPa, 东昆仑断裂的东南部为0.007 MPa, 地震破裂断层西南部的鲜水河断裂为0.005 MPa, 西秦岭北缘断裂的天水—宝鸡段为0.004 MPa, 陇县—宝鸡断裂为0.003 MPa. 该地震还使得龙日坝断裂、怒江断裂、西秦岭北缘断裂西部、秦岭北缘断裂、庄浪河断裂、日月山断裂北部、海原断裂、岷江断裂、玉树—玛曲断裂、金沙江断裂的库仑破裂应力减少; 减少尤为显著的断裂为龙门山断裂的断层破裂段、岷江断裂和鲜水河断裂的炉霍段, 其库仑破裂应力减少分别达0.04—0.7 MPa, 0.001—0.1 MPa和0.008—0.01 MPa. 本次地震在小金河、安宁河和大凉山断裂面上产生的库仑应力变化很小, 对断层地震活动没有显著影响.

关键词 汶川地震 库仑破裂应力 断层相互作用 震源机制

文章编号: 0253-3782(2009)02-0128-12 **中图分类号:** P315.72⁺⁷ **文献标识码:** A

The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults

Wan Yongge^{1,2,*} Shen Zhengkang³⁾ Sheng Shuzhong¹⁾ Xu Xiaofeng⁴⁾

- 1) Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Yanjiao, Sanhe City,
Hebei Province, 065201, China
2) State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake
Administration, Beijing 100029, China
3) Department of Geophysics, School of Earth and Space Science, Peking University,
Beijing 100871, China
4) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

* 基金项目 国家自然科学基金(40374012, 40874022)资助.

收稿日期 2008-11-26 收到初稿, 2009-03-20 决定采用修改稿.

† 通讯作者 e-mail: wanyg217217@vip.sina.com.cn

Abstract: The 12 May 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake has changed the regional tectonic stress field significantly. It is important to know how such a change affects the tectonic loading process on regional faults and thenceforth the seismic potential of the region. Utilizing the slip distribution of the Wenchuan earthquake as the driving source, we computed the Coulomb stress changes on the neighborhood faults. Our result shows that the Coulomb stress has increased on northern and southern end of the Longmenshan, the southernmost Xianshuihe, East Kunlun, Longxian-Baoji, Elashan, Baiyu, southernmost Riyueshan, central segment of the Mabian-Yanjin, western segment of the Bangongcuo-Jiali, and Zemuhe fault. Most significant increases of the Coulomb stress are: 0.01 MPa and 0.03 MPa at southern and northern end of the Longmenshan fault, 0.03 MPa on western segment of the Qinling Southern Frontal fault, 0.007 MPa at southeast end of the East Kunlun fault, 0.005 MPa on the southernmost Xianshuihe fault, 0.004 MPa on the Tianshui-Baoji segment of the West Qinling Northern Frontal fault, and 0.003 MPa in Longxian-Baoji fault zone. The earthquake also decreased the Coulomb stress on the Longriba, Nujiang, western segment of the Qinling Northern Frontal, Zhuanglanghe, Haiyuan, Minjiang, and Yushu-Maqu fault. Large relaxation occurred on the ruptured part of the Longmenshan, Minjiang, and Luhuo segment of the Xianshuihe fault, with the Coulomb stress reduction ranging 0.04–0.7 MPa, 0.001–0.1 MPa and 0.008–0.01 MPa, respectively. The Coulomb failure stress projected on fault plane of the Xiaojinhe, Anninghe and Xiaojiang fault is nearly zero, indicating no significant influence of the Wenchuan earthquake on these faults.

Key words: Wenchuan earthquake; Coulomb stress change; fault interactions; focal mechanism

引言

2008年5月12日华南的四川省汶川发生了 M_w 7.9(M_s 8.0)地震。该地震发生于四川盆地西北部边缘的龙门山逆冲断裂带上，是青藏高原地壳物质的缓慢东向移动与四川盆地和华南地块硬性地壳对抗的构造运动过程的一部分。四川盆地的西北边缘历史上发生过数次破坏性地震，1933年8月25日的7.3级叠溪地震(阚荣举等，1977)以及1976年8月16日和23日的松潘7.2级双震(Molnar, Deng, 1984)距龙门山断裂带仅100 km左右(图1)。

龙门山断裂为东南部的四川盆地和西北部的青藏高原东部山区的明显分界线(Burchfiel *et al*, 1995)。低海拔平坦的四川盆地与在约100 km的宽度范围内平均海拔增至3 km的龙门山山脉形成鲜明对比。盆地之下的地壳与上地幔至250 km深度具有高P波波速，这使得类似于克拉通的盆地抵抗着中生代和新生代的变形。而龙门山山脉和青藏高原东部的地壳通常认为力学强度很低，在下地壳中有广泛的低速区(Wang *et al*, 2003; Yao *et al*, 2008)。突现造山过程的龙门山断裂带通常认为始于白垩纪，并在古新世重新恢复活动，从那时起一直变形至今。最近的GPS研究揭示跨断层有约1.5 mm/a的缩短(王阎昭等，2008)，并且自起始以来地质上累积了约10 km的总位移(Burchfiel *et al*, 1995)。

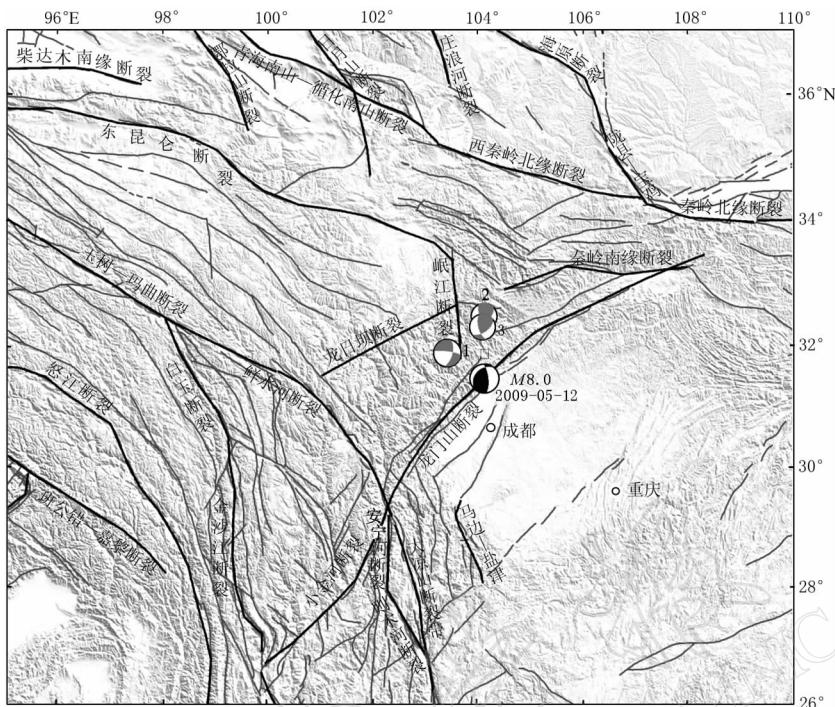


图 1 汶川地震的地质构造背景

海滩球为 2008 年汶川地震、1933 年叠溪地震(表示为 1)和 1976 年松潘双震(表示为 2 和 3)的发生位置与震源机制(下半球投影). 粗黑线为本研究所用的活动断层

Fig. 1 Tectonic setting of Wenchuan earthquake

Beach balls are the 2008 Wenchuan, 1933 Diexi (showed by 1) and 1976 Songpan earthquake doublets (showed by 2 and 3) focal mechanisms (lower hemisphere projection).
Thin black lines are active faults investigated in this study

近年来, 国际地震界广泛关注大地震产生的库仑破裂应力变化对后续地震发生位置和时间的影响(Harris, 1998; Stein, 1999; Steacy *et al*, 2005; Gomberg *et al*, 2008). 早在 20 世纪 80 年代初, 王仁等(1980, 1982)就模拟了华北地区 700 年来的应力演化过程, 给出了该地区的地震危险性分布. 黄福明和王廷榘(1980)研究了 1970 年通海地震、1975 年海城地震和 1976 年唐山地震的主震对后续余震的影响, 发现大多数强余震发生在流体静压力为正值的引张区内. Stein 和 Lisowski(1983)对 1979 年 Homestead Valley 地震序列进行研究, 发现余震丛集发生在应力增加区. 万永革等(2000)研究了中国大陆 4 次大地震对后续破裂事件的影响, 发现前面发生的事件对后续事件均有触发作用. Harris 等(1995)研究了南加州地震产生的静态应力变化对地震位置的影响, 得到了肯定的结论. Harris 和 Simpson(1996)的研究发现, 1857 年 Ft. Tejon 大地震产生的应力影区对南加州的后续地震有很强的抑制作用. 万永革等(2002)、Wan 等(2003, 2004)采用 Harvard 矩心矩张量目录, 在统计上进一步验证了前面大地震对后续大地震的影响. Robinson 和 Zhou(2005)考虑周围发震断层的形状, 研究了唐山地震初始破裂断层产生应力对后续断层破裂的影响, 并研究了唐山地震发生后对后续大余震的影响, 发现如果已知周围的断层滑动习性, 可以用来预测将来大余震发生的地点. Lienkaemper 等(2001)研究了 1989 年 Loma Prieta 地震

及深部蠕滑对已知滑动特性的 Hayward 断层的响应。McCloskey 等(2005)计算了 2004 年苏门答腊大地震产生的库仑破裂应力变化, 指出消减带的 Nias-Simeulue 段上库仑破裂应力显著增加, 3 个月后, 一次 $M_w 8.7$ 的地震就发生在该段上。汶川地震后, 已经开展了很多库仑破裂应力的研究。例如, 基于采用地震波资料快速测定的破裂结果, Parsons 等(2008)给出了龙门山断裂周围, 特别是四川盆地东部和东北部的几条断层上的库仑破裂应力变化。Toda 等(2008)采用地质研究确定的断层几何和运动特性, 对更大的区域进行了类似研究。虽然这些研究对我们理解区域应力变化及其相关的地震潜在危险性的变化有帮助, 然而他们在一定程度上面临着区域构造背景和地质断层信息的不完整及震源破裂模型具有较大的不确定性。本研究将弥补这些缺陷, 根据最新的断层几何和 GPS 速率场得到区域应力速率, 估计该区域的潜在地震危险性。

1 计算方法

地震是由地下的岩石错动产生的, 在地震前后比较短的时间内, 弹性能的释放是主要的物理过程。此时作为一阶近似, 可以把地球介质简化为半无限空间内均匀各向同性完全弹性体; 如果已知地震位错面的几何参数和错动量, 则可求出在弹性体内部产生的位移场和应变场。对此已有了严格的理论计算(Chinnery, 1963; 陈运泰等, 1975; 黄福明和王廷鍊, 1980; Okada, 1992)。在此, 我们用 Okada(1992) 给出的适用于各种类型断层的解析表达式, 计算地震产生的静态应力应变场。

运用库仑定则, 断面上的库仑破裂应力变化为

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

式中, $\Delta\tau_s$ 为剪切应力变化, $\Delta\sigma_n$ 为法向应力变化(拉伸为正), μ 为内摩擦系数, $\Delta\rho$ 为孔隙压力变化(Stein *et al*, 1992; King *et al*, 1994)。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

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

在我们的计算中, 参照 Stein 等(1992) 和 King 等(1994) 的做法, 采用 $\mu' = 0.4$ 。数值试验表明, 改变此值对计算得到的库仑破裂应力变化的空间分布影响不大, 但可以对应力变化的大小有一定的影响。我们将剪切应力变化投影到断层的滑动方向上, 与滑动方向一致取正, 反之取负。滑动方向取自邓起东等(2002)给出的活动断层滑动特性。

2 地震及其周围断层参数的选取

2.1 地震参数

表 1 列出了世界著名地震测定机构给出的地震位置和震源机制参数。所有震源机制均表明, 该地震为具有右旋走滑分量的逆冲事件。除了震源机制解, 许多研究小组还给出了断层上的破裂分布(陈运泰等, 2008; 王卫民等, 2008; Ji, Hayes, 2008; Nishimura, Yagi, 2008; Sladen, 2008)。虽然这些结果在细节上略有差别, 但均表明该地震为破裂自西南向东北方向传播的单侧破裂, 西南部以逆冲为主、东北部以走滑为主。我们采用汶川地震前后周围的 GPS 资料和 InSAR 资料, 反演了该地震的同震滑动分布及断层的几何形态(Shen *et al*, 2009)。结果表明, 地震破裂几何形态和滑动分布较为复杂, 从西南往东北的断层逐渐由倾向西北变为垂直断层, 滑动分布逐渐由逆冲断层为主转换为走滑断层为主。

滑动分布有两个近地表的峰值：映秀附近最大逆冲分量达 5.8 m，北川附近的最大逆冲分量和右旋走滑分量分别达 5.0 m 和 4.8 m(图 2)。地震释放总地震矩达 $1.08 \times 10^{21} \text{ N}\cdot\text{m}$ ，等价于 $M_w 7.95$ 。由于该模型考虑了断层倾角和滑动在断层走向和深度上的分布，并且与地质调查结果较为吻合，本研究采用该模型计算地震对周围断层的影响。

表 1 研究机构给出的汶川地震震源参数

Table 1 Source parameters of the Wenchuan earthquake from different institutes

研究 机构	位置		深 度 /km	P 轴		T 轴		节面 I			节面 II			震级
	$\lambda_E/^\circ$	$\varphi_N/^\circ$		走向 /°	倾角 /°	走向 /°	倾角 /°	走向 /°	倾角 /°	滑动角 /°	走向 /°	倾角 /°	滑动角 /°	
CENC	103.4	31.0	14											$M_s 8.0$
CMT	104.10	31.44	12.8	107°	18°	229°	58°	231	35	138	357	68	63	$M_w 7.9$
NEIC	103.186	30.969	16	302	6	202	57	2	47	45	238	59	128	$M_w 7.9$

注：CENC 引自 http://www.csi.ac.cn/sichuan/sichuan080512_cs1.htm；CMT 引自 <http://www.globalcmt.org/cmtsearch.html>；NEIC 引自 <ftp://hazards.cr.usgs.gov>。

表 2 所用断层几何参数及库仑破裂应力变化

Table 2 Geometric fault parameters and Coulomb stress change

断裂名称	倾角/°	倾向	滑动角/°	$\Delta CFS/10^5 \text{ Pa}$
柴达木南缘断裂	45	N	90	-0.002—-0.001
鄂拉山断裂	65	SW	180	0—0.008
青海南山—循化南山断裂	90		0	0.01
日月山断裂	75	NNE	180	-0.005—0.007
庄浪河断裂	90		180	-0.007—-0.005
海原断裂	70	SW	15	-0.007—0
西秦岭北缘断裂	60	SW	15	-0.02—0.04
陇县—宝鸡断裂	45	SW	45	0.03
秦岭北缘断裂	70	N	15	-0.01—0.04
东昆仑断裂带	70	NW	15	0.004—0.07
龙门山断裂带南段	60	NW	90	0.05—0.1
岷江断裂	75	E	45	-1—-0.01
龙门山断裂带东北段	60	NW	180	0.02—0.3
龙日坝断裂	90		180	-0.6—-0.2
玉树—玛曲断裂带(北西段)	75	N-NE	0	-0.008—-0.001
玉树—玛曲断裂带(南东段)	75	N-NE	0	-0.1—-0.01
鲜水河断裂(甘孜炉霍)	90		0	-0.1—-0.08
鲜水河断裂(炉霍—道孚)	90		0	0.02
鲜水河断裂(道孚—康定)	90		0	0.05
鲜水河断裂(康定—石棉)	90		0	0
怒江断裂带	45	NE	90	-0.01—0.002
金沙江断裂带(白玉断裂)	75	E	180	0.02
金沙江断裂带	75	E	180	-0.02—0
班公错—嘉黎断裂带	75	NE	135	-0.0005—0.002
马边—盐津断裂带	90		0	0—0.003
小金河断裂	75	SE	0	0
大凉山断裂	75	NE	0	0
秦岭南缘断裂	75	N	80	-0.02—0.3
安宁河断裂	90		45	0
则木河断裂	65	NE	45	0

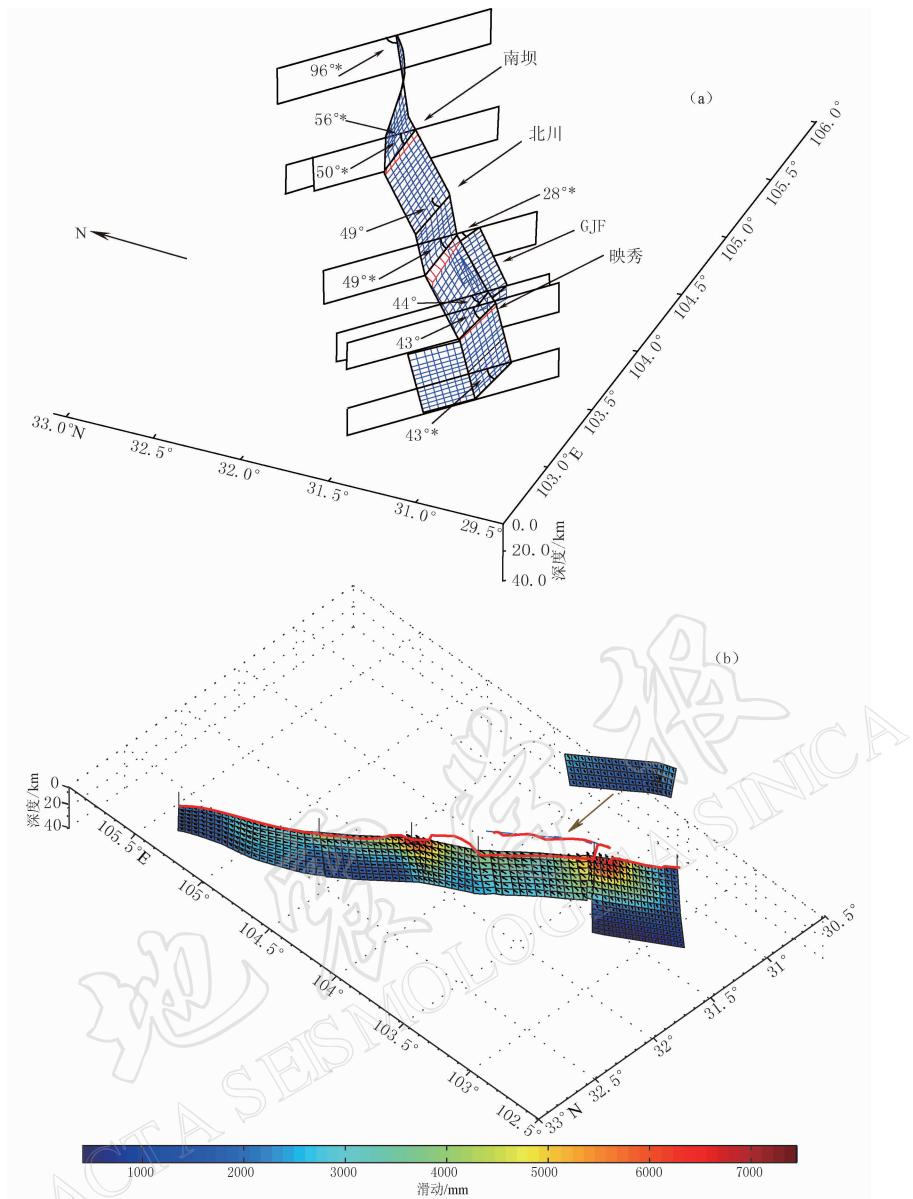


图 2 汶川地震断层几何和同震破裂分布反演结果(引自 Shen 等, 2009)

(a) 断层几何形状. 自西北以 45° 俯视角观看断层面, 断层倾角沿倾角延伸方向不变, 但沿走向线性变化, 带有 * 的断层节点的 6 个倾角值为反演结果, 其它倾角值为线性内插结果或与邻近节点相同(对于西南端点); (b) 同震破裂分布. 自西南以 45° 俯视角观看断层面, 黑箭头为断层面上的滑动矢量, 其大小用子断层的颜色表示, 红粗线为徐锡伟等(2008)给出的地表破裂迹线, 地表的黑短线段对应与图(a)中的分段位置. 为避免图形重叠, 灌县—江油断裂偏离原位置绘图(其地表迹线用蓝线表示)

Fig. 2 Co-seismic slip distribution of the Wenchuan earthquake
and fault geometry inverted by Shen *et al* (2009)

(a) Fault geometry. The fault planes are viewed from southwest, at 45° elevation angle. Six dip angles at fault nodal points are inverted in the solution, which are marked with a star ‘*’. The other dip angles indicated in the figure are either interpolated or tied to the neighbor (for the southwestern end point); (b) Coseismic slip distribution. The fault planes are viewed from northwest, at 45° elevation angle. Black arrows show the slip vectors on the fault patches, whose amplitudes are denoted by patch color. Red thick lines are the mapped traces of surface breaks from Xu *et al* (2008). The short black lines correspond to segment point in a). The Guanxian–Jiangyou fault is plotted away from its actual location (whose surface trace is marked as a blue line to avoid image overlap)

2.2 周围断层参数

为计算库仑破裂应力变化,首先需要明确区域断层的几何形状和运动学特征。我们采用两种途径来构建断层模型参数:第一种是利用地质和地震信息得到的断层模型。邓起东等(2002)提供了该地区的活动断层性状数据库,并对其运动学特征进行了分析。我们采用这些断层模型并对其进行了简化,仅将GPS数据估计的滑动速率大于1 mm/a(王阎昭等,2008)和历史上发生过强震(Molnar, Deng 1984)的断层列入(表2)。除此之外,我们还将Shen等(2005)、王阎昭等(2008)最近发现的右旋滑动速率达4—6 mm/a的较为活跃的龙门坝断层也列入其中(表2)。

由于研究区域的地震震源深度在0—25 km的范围内(朱艾斓等,2005),因此我们研究汶川地震在10 km深度上产生的库仑破裂应力变化。我们也计算了5 km和15 km深度的库仑破裂应力变化,发现模式和量值没有发生明显变化,鉴于篇幅,本文略去这些深度的库仑破裂应力变化分布图。

3 结果

根据上面的地震断层模型和活动断层形状及滑动特性,我们计算了投影到断层面和滑动方向上的库仑破裂应力变化(图3)。应力增加的断裂主要分别在地震断层的东北、西北和西南,有鲜水河断裂最南端、龙门山断裂北部和最南端、东昆仑断裂段、陇县—宝鸡断裂、鄂拉山断裂、白玉断裂、日月山断裂南端、马边—盐津断裂中部、班公错—嘉黎断裂西部、则木河断裂、青海南山—循化南山断裂,库仑破裂应力增加量值达0.00001—0.06 MPa。库仑破裂应力增加尤为显著的断裂量值分别为:龙门山断裂的地震断层南端最大增加0.01 MPa、北端为0.03 MPa,秦岭南缘断裂的西南部最大增加0.03 MPa,东昆仑断裂的东南部为0.01 MPa,地震破裂断层西南部的鲜水河断裂为0.005 MPa,青海南山—循化南山断裂为0.001 MPa,陇县—宝鸡断裂为0.02 MPa,西秦岭北缘断裂天水—宝鸡段为0.003 MPa,应注意加载断层上今后的地震活动。而地震发生使得龙日坝断裂、怒江断裂、西秦岭北缘断裂西部、秦岭北缘断裂、庄浪河断裂、日月山断裂北部、海原断裂、岷江断裂、玉树—玛曲断裂、金沙江断裂的库仑破裂应力减少。减少尤为显著的断裂为龙门山断裂的断层破裂段、岷江断裂和鲜水河断裂的炉霍段,库仑破裂应力变化达-0.0005—-0.06 MPa。具体数值见表2。本次地震在小金河、安宁河和大凉山断裂面上产生的库仑应力变化为 10^{-5} MPa以下,对断层没有显著影响。

与前人得到的结果比较,发现本文结果与Parsons等(2008)和Toda等(2008)的结果大体一致。例如Parsons等(2008)和我们估计的库仑破裂应力变化在东昆仑断裂带东部和鲜水河断裂带的东南部增加,而在岷江断裂上降低。然而本研究的区域范围远大于他们的范围,并且本文给出了更多的区域断层的库仑破裂应力变化。将本研究结果与Toda等(2008)的结果比较,我们发现除了震源北部区域和近破裂区域的断层外,大部分断层的库仑破裂应力变化具有很好的一致性。例如,我们的结果显示岷江断裂北段有0—0.05 MPa的库仑破裂应力变化,与Toda等(2008)得到的库仑破裂应力增加(采用Ji和Hayes(2008)的模型约为0.05 MPa,采用Nishimura和Yagi(2008)的模型约为0.02 MPa)形成鲜明对比。本研究结果给出秦岭南缘断裂的西段和中段库仑破裂应力增加,而他们得到的库仑破裂应力变化符号较为混乱。本研究和Toda等(2008)均采用邓起东等(2002)的活动构造分

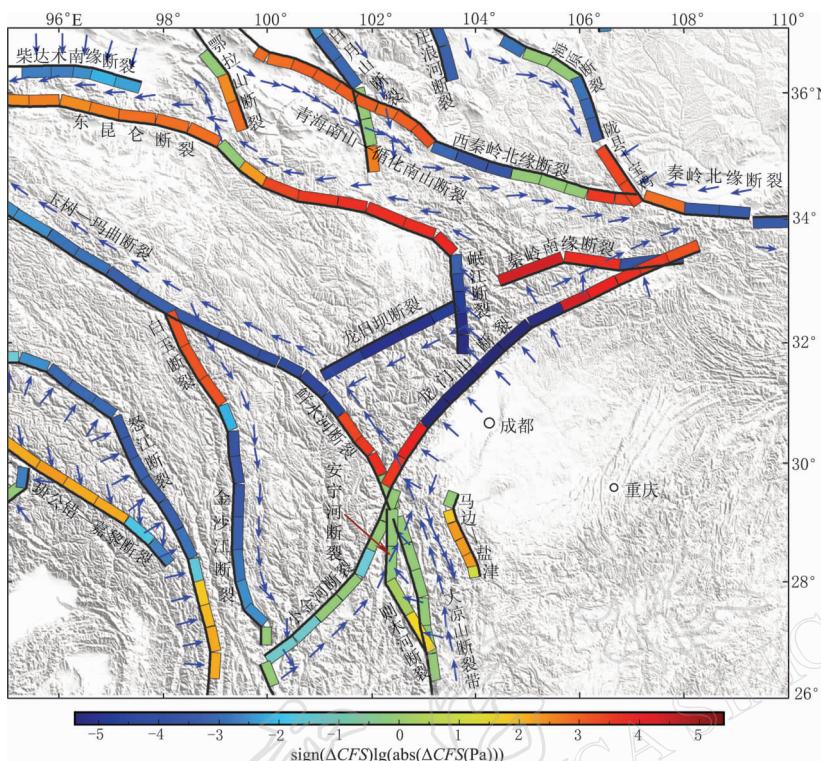


图3 汶川地震在周围活动断层的断层面和滑动方向上产生的库仑破裂应力变化

图中，绿-蓝色为库仑破裂应力下降的断层，颜色表示库仑破裂应力变化绝对值的对数，加负号以与库仑破裂应力增加断层区别，红-绿色为库仑破裂应力增加的断层，颜色表示库仑破裂应力变化的对数。断层特性用蓝箭头表示，指向断层的箭头表示为逆冲断层，远离断层的箭头表示拉张断层，与断层平行的箭头表示走滑断层上盘的运动方向。断层的粗黑线边缘为断层出露

Fig. 3 Coulomb failure stress change projected on the fault plane and in the slip direction of the surrounding active faults generated by the Wenchuan earthquake

The colors between blue and green stand for decrease and that between red and green represent increase of the Coulomb failure stress change, respectively. The colors correspond to the logarithm of the absolute Coulomb failure stress change. Minus and positive signs stand for decrease and increase of the Coulomb failure stress, respectively. The fault sense of slip is denoted by blue vectors. The vectors pointing to the fault mean thrust fault motion, and the vectors pointing away from fault stand for normal fault motion. The vectors parallel to the fault stand for strike-slip motion direction of the fault hanging-wall. Thick black lines denote the fault surface traces

析来进行库仑破裂应力计算，故采用不同的汶川地震震源破裂模型可能是造成这种差别的原因。虽然所有的地震破裂模型均在破裂面上表现为两个破裂集中区，但其空间位置有十几公里的差别。另外一种明显的差别来自于断层几何形状：Ji 和 Hayes (2008) 及 Nishimura 和 Yagi (2008) 的破裂模型表现为沿走向固定不变的倾角，而 Shen 等(2009)的破裂模型从西南往东北的断层逐渐由倾向西北变为垂直断层，滑动分布逐渐由逆冲断层为主转换为走滑断层为主。因此该模型不允许断层东北端有大的水平缩短分量，从而导致 NW-SE 向分量在邻近断层上减小。由于 Shen 等(2009)的断层模型根据近场 GPS 和大量 InSAR 资料确定，并且与地表测量数据符合较好，该模型比地震之后仅采用远震数据快速测定的其它初步模型要更精确。我们的研究基于该模型可能提供了比上述研究更好的库仑破裂应力变化估计。

4 讨论和结论

我们根据汶川地震的震源破裂分布,计算了在周围断层上的库仑破裂应力变化。结果表明,该地震的发生使得东昆仑断裂段、青海南山—循化南山断裂、陇县—宝鸡断裂、鄂拉山断裂、白玉断裂、日月山断裂南端、马边—盐津断裂中部、班公错—嘉黎断裂西部加载;使得龙日坝断裂、怒江断裂、西秦岭北缘断裂、秦岭北缘断裂、庄浪河断裂、日月山断裂北部、海原断裂、岷江断裂、玉树—玛曲断裂、金沙江断裂的库仑破裂应力减少。加载效应尤为显著的有龙门山断裂的地震断层两端、秦岭南缘断裂的西南部、东昆仑断裂的东南部、鲜水河断裂、陇县—宝鸡断裂和西秦岭断裂的天水—宝鸡段上,库仑破裂应力达0.001—0.06 MPa。卸载效应尤为显著的有龙门山断裂的断层破裂段、岷江断裂和鲜水河断裂的炉霍段,库仑破裂应力减少达0.0005—0.06 MPa。该结果对将来这些地震的危险性分析具有一定的参考意义。

本研究选择了10 km为计算库仑破裂应力变化的深度。我们也研究了其它深度的库仑破裂应力变化,发现库仑破裂应力变化的模式没有大的变化。因此,本文仅分析了10 km深处的库仑破裂应力变化。

本研究对周围断层活动影响为一级近似估算,因此在计算中采用比较简单的弹性半空间位错模型。实际上,地球介质的三维不均匀结构对库仑破裂应力变化的计算结果有一定影响。另外,由于地球的粘弹性松弛效应,大地震后会产生应变的扩散(Deng *et al*, 1998; 沈正康等, 2003, 2004; 万永革等, 2007, 2008),这些效应也会对库仑破裂应力变化结果产生一些影响。然而需要说明的是,粘弹性效应仅在研究时段时间与粘弹性模型的特征应力松弛时间可以比拟或大于应力释放的特征时间时才变得比较重要。这样的特征时间对于麦克斯韦流变体,可按 $\tau=2\eta/\mu$ 计算。软流层粘度的典型值范围为 10^{19} — 10^{21} Pa·s,这预示着剪切模量为 3×10^4 MPa的介质特征时间范围为 3×10^8 — 3×10^{10} s,对应于10—1000年。粘弹性效应在描述发生时间间隔为十年至几个世纪的邻近大地震之间的相互作用是不可忽略的。对于在震后较短时间间隔内对地震发生影响的粗略估计,这种效应是可以忽略不计的。

高孔隙压力流体的存在,可以解释圣安德烈斯断层主压应力方向近乎与断层垂直和大地热流低的现象。巴巴多斯俯冲带的地震和钻探结果以及最近日本、新西兰地震层析成像和大地电磁的成果也都提供了高孔隙水压存在的观测证据(Zhao *et al*, 1996)。因此地震产生的应力变化导致的流体在含水层中的迁移,可能是在中等时间尺度(几天至几个月)上影响后续地震发生的因素之一(Hudnut *et al*, 1989; Noir *et al*, 1997; 万永革等, 2006, 2007, 2008)。由于流体迁移参数的不确定性在本研究的计算中未针对不同情况加以考虑。

由大地震之后的大量余震发生会产生的地表可以观测到的地表位移场(万永革等, 2005)可以推知,大量余震也会对周围断层产生一定的影响。但由于目前还没有可以利用的大量余震的震源破裂信息,本研究也未对其进行考虑。但根据美国南加州 Landers 地震的余震产生的地表位移场的分析可知,余震产生的位移场与主震位移场方向基本一致(万永革等, 2005),并且不足主震产生位移场的10%。由此可以推断,余震产生的应力变化也是不大的。另外根据朱艾斓等(2008)得到的精确定位余震目录,按照时振梁等(1990)给出的能量与体波震级的统计公式($\lg E = 2.77 + 1.57 M_B$, 此处E为能量,单位为J; M_B 为体

波震级), 可以得到余震的总辐射能量为 2.8×10^{14} J. 而 NEIC 对该地震的辐射能量估计为 7.7×10^{15} J, 余震释放能量为主震释放能量的 4%. 因此可以想象, 即使考虑了余震的影响也不会改变本研究结果的空间模式. 本研究在一级近似下给出了汶川地震对周围断层影响的图式, 对地震危险性评估具有一定参考意义.

感谢吴忠良研究员对本文工作的鼓励; 审稿专家为本文提出了建设性修改意见. 作者一并表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 陈运泰, 林邦慧, 林中洋, 李志勇. 1975. 根据地面形变的观测研究 1966 年邢台地震的震源过程[J]. 地球物理学报, **18**(3): 164–182.
- 陈运泰, 许力生, 张勇, 杜海林, 冯万鹏, 刘超, 李春来. 2008. 2008 年 5 月 12 日汶川特大地震震源特性分析报告[R/OL]. 汶川地震专题/初步研究与考察结果(一). [2008-10-20] [http://www.eq-igp.ac.cn/汶川地震专题/初步研究与考察结果\(一\).](http://www.eq-igp.ac.cn/汶川地震专题/初步研究与考察结果(一).)
- 邓起东, 张培震, 冉勇康, 杨晓平, 阎伟, 楚全芝. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学(D辑), **32**(12): 1020–1030.
- 黄福明, 王廷榤. 1980. 倾斜断层错动产生的应力场[J]. 地震学报, **2**(1): 1–20.
- 阚荣举, 张四昌, 晏风桐, 俞林胜. 1977. 我国西南地区现代构造应力场与现代构造活动特征的探讨[J]. 地球物理学报, **20**(2): 96–109.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 李铁明, 曾跃华. 2004. 华北地区 700 年来地壳应力场演化与地震发生研究[J]. 中国地震, **20**(3): 211–228.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 曾跃华, 任群. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究[J]. 地球物理学报, **46**(6): 786–795.
- 时振梁, 张少泉, 赵荣国, 吴开统, 陆其部, 张敏政, 卓钰如. 1990. 地震工作手册[M]. 北京: 地震出版社: 130.
- 万永革, 吴忠良, 周公威, 黄静. 2000. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题[J]. 地震学报, **22**(6): 568–576.
- 万永革, 吴忠良, 周公威, 黄静, 秦立新. 2002. 地震静态应力触发模型的全球检验[J]. 地震学报, **24**(3): 302–316.
- 万永革, 沈正康, 兰从欣. 2005. 兰德斯地震断层面及其附近余震产生的位移场研究[J]. 地震学报, **27**(2): 139–146.
- 万永革, 沈正康, 尚丹. 2006. 2005 年 10 月巴基斯坦 M_w7.6 地震对余震的触发研究[J]. 中国地震, **22**(3): 277–286.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 盛书中. 2007. 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, **29**(2): 115–129.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 盛书中, 徐晓枫. 2008. 唐山地震序列应力触发的粘弹性力学模型研究[J]. 地震学报, **30**(6): 581–593.
- 王仁, 何国琦, 殷有泉, 蔡永恩. 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟[J]. 地震学报, **2**(1): 32–42.
- 王仁, 孙荀英, 蔡永恩. 1982. 华北地区近 700 年地震序列的数学模拟[J]. 中国科学(B辑), **8**: 745–753.
- 王卫民, 赵连锋, 李娟, 姚振兴. 2008. 四川汶川 M_s8.0 级地震震源过程[J]. 地球物理学报, **51**(5): 1403–1410.
- 王阎昭, 王恩宁, 沈正康, 王敏, 甘卫军, 乔学军, 孟国杰, 李铁明, 陶玮, 杨永林, 程佳, 李鹏. 2008. 基于 GPS 资料约束反演川滇地区主要断裂现今活动速率[J]. 中国科学(D辑), **38**(5): 582–597.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 马保起, 陈杰, 周荣军, 何宏林, 田勤俭, 何玉林, 王志才, 孙昭民, 冯希杰, 于贵华, 陈立春, 陈桂华, 于慎鄂, 冉勇康, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川 M_s8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, **30**(3): 597–629.
- 朱艾斓, 徐锡伟, 周永胜, 尹京苑, 甘卫军, 陈桂华. 2005. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义[J]. 地球物理学报, **48**(3): 629–636.
- 朱艾斓, 徐锡伟, 刁桂苓, 苏金蓉, 冯向东, 孙晴, 王亚丽. 2008. 汶川 M_s8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析[J]. 地震地质, **30**(3): 759–767.

- Burchfiel B C, Chen Z, Liu Y, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China [J]. *International Geological Review*, **37**(8): 661–735.
- Chinnery M A. 1963. The stress changes that accompany strike-slip faulting[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **53**: 921–932.
- Deng J, Gurnis M, Kanamori H, Hauksson E. 1998. Viscoelastic flow in the lower crust after the 1992 Landers, California, earthquake[J]. *Science*, **282**: 1689–1692.
- Gomberg J, Felzer K. 2008. A model of earthquake triggering probabilities and application to dynamic deformations constrained by ground motion observations[J]. *J Geophys Res*, **113**: B10317, doi:10.1029/2007JB005184.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *J Geophys Res*, **103**: 24347–24358.
- Harris R, Simpson R. 1996. In the Shadow of 1857—the effect of the great Ft Tejon earthquake on subsequent earthquakes in Southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **23**(3): 229–232.
- Harris R A, Simpson R W, Reasenberg P A. 1995. Influence of static stress changes on earthquake locations in southern California[J]. *Nature*, **375**: 221–224.
- Hudnut K W, Seeber L, Pacheco J. 1989. Cross fault triggering in the November 1987 Superstition Hills earthquake sequence, southern California[J]. *Geophys Res Lett*, **16**: 199–202.
- Ji C, Hayes G. 2008. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w7.9$ eastern Sichuan, China earthquake[EB/OL]. [2008-10-20]http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php.
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **84**: 935–953.
- Lienkaemper J J, Galehouse J S, Simpson R W. 2001. Long-term monitoring of creep rate along the Hayward fault and evidence for a lasting creep response to 1989 Loma Prieta Earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **28**(11): 2265–2268.
- McCloskey J, Nalbant S S, Steacy S. 2005. Earthquake risk from co-seismic stress[J]. *Nature*, **434**: 291.
- Molnar P, Deng Q. 1984. Faulting associated with large earthquakes and the average rate of deformation in central and eastern Asia[J]. *J Geophys Res*, **89**: 6203–6228.
- Nishimura N, Yagi Y. 2008. Rupture process for May 12, 2008 Sichuan earthquake (preliminary result)[EB/OL]. [2008-10-20]http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~nisimura/20080512/.
- Noir J, Jacques E, Békri S, Adler P, Tapponnier P, King G. 1997. Fluid flow triggered migration of events in the 1989 Dobi earthquake sequence of central Afar[J]. *Geophys Res Lett*, **24**: 2335–2338.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**: 1018–1040.
- Parsons T, Ji C, Kirby E. 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin[J]. *Nature*, doi:10.1038/nature07177.
- Rice J R. 1992. Fault stress states, pore pressure distribution, and the weakness of the San Andreas fault[C]// Evans B, Wong T F eds. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rock*. London: Academic Press: 475–503.
- Robinson R, Zhou S. 2005. Stress interactions within the Tangshan, China, earthquake sequence of 1976[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**(6): 2501–2505.
- Shen Z K, Lü J, Wang M, Bürgmann R. 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *J Geophys Res*, **110**: B11409.
- Shen Z K, Sun J, Zhang P, Wan Y, Wang M, Bürgmann R, Zeng Y, Gan W, Liao H, Wang Q. 2009. A rare and unusual event: Deformation and slip of the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. (submitted to Nature Geoscience).
- Sladen A. 2008. Preliminary Result 05/12/2008 ($M_w7.9$), East Sichuan[EB/OL]. [2008-10-20]http://www.tectonics.caltech.edu/slipp_history/2008_e_sichuan/e_sichuan.html.
- Steacy S, Gomberg J, Cocco M. 2005. Introduction to special section: Stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard[J]. *J Geophys Res*, **110**: B05S01, doi:10.1029/2005JB003692.
- Stein R S. 1999. The role of stress transfer in earthquake occurrence[J]. *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[J]. *Science*, **258**: 1328–1332.
- Stein R S, Lisowski M. 1983. The 1979 Homestead Valley earthquake sequence, California: Control of aftershocks and postseismic deformation[J]. *J Geophys Res*, **88**: 6477–6490.
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, Stein R S. 2008. 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 Lett*, **35**, L17305, doi:10.1029/2008GL034903.
- Wan Y G, Wu Z L, Zhou G W. 2003. Small stress change triggering a big earthquake: A test of the critical point hypothesis for earthquake[J]. *Chin Phys Lett*, **20**(9): 1452–1455.
- Wan Y, Wu Z, Zhou G. 2004. Focal mechanism dependence of static stress triggering of earthquakes[J]. *Tectonophysics*, **390**: 235–243.
- Wang C Y, Chan W W, Mooney W D. 2003. Three-dimensional velocity structure of crust and upper mantle in southwestern China and its tectonic implications[J]. *J Geophys Res*, **108**, doi:10.1029/2002JB001973.
- Yao H, Beghein C, van der Hilst R D. 2008. Surface wave array tomography in SE Tibet from ambient seismic noise and two-station analysis: II. Crustal and upper-mantle structure[J]. *Geophys J Int*, **173**: 205–219, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03696.x.
- Zhao D, Kanamori H, Negishi H, Wiens D. 1996. Tomography of the source area of the 1995 Kobe earthquake: Evidence for fluids at the hypocenter? [J]. *Science*, **274**: 1891–1894.