

doi:10.3799/dqkx.2013.039

汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟

李玉江, 陈连旺, 陆远忠, 詹自敏

中国地震局地壳应力研究所地壳动力学重点实验室, 北京 100085

摘要: 大地震发生后, 研究地震的发生对周围断层的影响尤为重要. 利用川西—藏东地区三维粘弹性有限元模型, 考虑地表高程和粘弹性松弛等因素的影响, 研究主要断裂带库仑应力累积速率和汶川地震的发生对周围断层的影响. 结果表明: (1) 龙门山断裂带年累积速率为 $0.28 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3}$ MPa/a, 这种较小的累积速率与龙门山断裂带强震较长复发间隔一致; (2) 汶川地震的发生除造成震源区应力减小外, 还造成断裂带北东段不同程度的应力增加, 这与震后余震的分布基本吻合; (3) 鲜水河断裂北西段、东昆仑、龙日坝、岷江以及虎牙断裂库仑应力水平增加显著, 且汶川地震对于玉树地震的发生有微弱的加载效应; (4) 汶川地震的发生造成鲜水河断裂带强震复发间隔缩短约 52~104 a, 是值得关注的强震危险区.

关键词: 龙门山断裂带; 汶川地震; 应力累积速率; 库仑破裂应力; 数值模拟.

中图分类号: P553

文章编号: 1000-2383(2013)02-0398-13

收稿日期: 2012-05-09

Numerical Simulation on Influences of Wenchuan Earthquake on the Stability of Faults in the Neighborhood

LI Yu-jiang, CHEN Lian-wang, LU Yuan-zhong, ZHAN Zi-min

Key Laboratory of Crustal Dynamics, Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China

Abstract: When a major earthquake occurred, it's critical to analyze the influences on the surrounding faults and the potential seismic activity. In this paper, a complex viscoelastic model of western Sichuan and eastern Tibet regions is constructed including the topography, and then we find out the Coulomb failure stressing rate on these major faults and calculate the stress change caused by the Wenchuan earthquake taking the post-seismic relaxation into consideration. Our preliminary results indicate that: (1) the Coulomb stressing rate in the Longmen Shan fault is lower with values from 0.28×10^{-3} MPa/a to 0.35×10^{-3} MPa/a, which is consistent with the previous long recurrence interval of Wenchuan earthquake; (2) The Wenchuan earthquake not only caused the Coulomb failure stress decrease in the source region, but also the stress increase in the north-eastern segment, and it's comparatively consistent with the aftershock distribution; (3) The Coulomb failure stress change caused by Wenchuan earthquake showed significant increase on five major fault segments, which were northwestern segment of Xianshui fault, eastern Kunlun fault, Longriba fault, Minjiang fault and Huya fault respectively, also the Coulomb failure stress on the fault plane of the Yushu earthquake was faintly increased; (4) The characteristic earthquake recurrence interval of the Xianshui fault is delayed by 52-104 a deduced from the Wenchuan earthquake, so it's ranked the high seismic hazard region in the future.

Key words: Longmen Shan fault zone; Wenchuan earthquake; Coulomb failure stressing rate; Coulomb failure stress; numerical simulation.

2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 级地震发生在南北地震带中段、青藏高原东缘的 NE 向龙门山断裂带上. 该断裂带由一系列大致平行的叠瓦状冲断带构成, 具有典型的逆冲推覆构造特征和前展式发育

模式, 自西北向东南发育有汶川—茂汶断裂(后山断裂)、映秀—北川断裂(中央断裂)、彭县—灌县断裂(前山断裂)和龙门山山前隐伏断层. 前 3 条断裂倾角在近地表较大, 约为 $60^\circ \sim 70^\circ$, 随深度向下“犁形”

基金项目: 中国地震局地壳应力研究所基本科研业务专项(No. ZDJ2010-12, 2012-09); 国家科技支撑项目(No. 2012BAK19B03).

作者简介: 李玉江(1982—), 男, 助理研究员, 主要从事应力应变场和地震活动性研究. E-mail: toleeyj@gmail.com

或“铲状”逐渐变缓,在地下 20~30 km 处收敛为一条剪切带,成为青藏高原推覆于四川盆地之上的主控断裂区域(Burchfiel *et al.*, 1995; Densmore *et al.*, 2007; Burchfiel *et al.*, 2008; 滕吉文等, 2008; 张培震等, 2008). 作为青藏高原东北缘与四川盆地的分界线,龙门山断裂带具有十分复杂的地质结构和演化历史(Burchfiel *et al.*, 1995). 该地域地表地形强烈起伏,两侧地形高差达 3 500±500 m 左右,而地壳厚度在龙门山西北部为 60±5 km 左右,四川盆地为 40±2 km 左右. 变化幅度达 15~20 km 的突变地域,在重力作用下造成深部物质与能量的强烈交换,形成应力作用的耦合地带(滕吉文等, 2008). 另外, GPS 研究结果显示汶川地震前龙门山断裂相对四川盆地的运动很小,跨过整个龙门山断裂带,水平走滑和缩短分量均在 2 mm/a 左右的误差范围内,速度矢量的大小和方向都很难看出两者之间的差别(张培震等, 2008).

自有历史记录以来,龙门山地区曾发生多次强震活动,1933 年 8 月 25 日岷山叠溪 7.3 级地震(阚荣举等, 1977)以及 1966 年 8 月 16 日和 23 日的松潘—平武 7.2 级双震(Molnar and Deng, 1984), 距离龙门山断裂带 100 km 左右. 而汶川—茂县断裂带仅在 1657 年发生 6.5 级地震,至今 300 多年里再也没有发生过 6 级以上地震,北川—映秀断裂仅在 1958 年发生 6.2 级地震,灌县—江油断裂未发生过 6 级以上地震. 龙门山断裂系长期以来相对平静,而汶川地震就发生在历史地震并不活跃的龙门山断裂带上.

汶川地震发生后,众多学者从震源破裂过程(陈运泰, 2008; 王卫民等, 2008; 王敏, 2009)、地表破裂带特征(徐锡伟等, 2008)、地质构造背景(张培震等, 2008; 闻学泽等, 2009)以及动力学机制(滕吉文等, 2008; 李延兴等, 2009; 朱守彪和张培震, 2009)等方面进行了广泛的探讨,为本次工作的开展提供了重要参考依据. 目前汶川地震对周围断层活动影响方面的研究,大多数是利用均匀弹性位错模型来计算静态库仑破裂应力变化.

1 库仑破裂应力研究现状

近年来,静态库仑破裂应力被广泛用来讨论主余震之间的关系以及强震序列间的应力触发作用. Stein and Lisowski(1983)研究了 1979 年加州地震造成沿破裂面的库仑应力变化以及与后续余震分布

关系,发现余震丛集于应力增加区. King *et al.* (1994)计算了 1992 年 Landers 7.4 级地震造成的优势破裂面上的库仑应力变化,并研究了该地震的发生对周围断层面应力的影响. Stein *et al.* (1992)研究了土耳其北安纳托利亚断裂带上 1939—1992 年间发生的 10 个 $M \geq 6.7$ 级地震的库仑破裂应力演化过程,发现 90% 的地震是被先前地震所触发. Deng *et al.* (1996, 1997)利用二维弹性位错理论计算 1812—1995 年发生在南加州的中强地震在后续地震破裂面上产生的库仑破裂应力变化,发现 95% 的 $M \geq 6$ 地震和 85% 的 $M \geq 5$ 地震发生在库仑应力的增加区. 沈正康等(2003)利用粘弹性模型,对青藏高原北部东昆仑断裂带 5 个 $M \geq 7$ 大地震之间的应力转移和断层相互作用进行研究,发现前 4 个地震均造成 2001 年可可西里地震断层面上库仑破裂应力的增加. 陈连旺等(2008)利用三维有限元模型,研究川滇地区 1981—2000 年 $M \geq 6.5$ 地震序列的应力加卸载效应,发现后续地震全部位于已发地震所引起的库仑破裂应力增加区. 陈连旺等(2001)利用三维粘弹性模型,研究 1966 年邢台地震所引起的地震应力场的动态演化及其对 1976 年唐山地震的触发作用. 万永革等(2007)通过对青藏高原东部 20 个 $M \geq 7$ 大地震应力演化与地震触发作用进行研究,发现 85% 地震是由于库仑破裂应力的增加而被触发. 应用粘弹性力学模型,万永革等(2008)研究唐山地震的应力触发效应,发现 95% 的余震发生在库仑破裂应力增加的区域. 利用弹性位错模型,万永革等(2010)研究 2008 年于田 7.3 级地震对周围断层库仑破裂应力的影响,并发现 2005 年巴基斯坦地震对于田地地震的弱加载效应. 上述研究表明强震造成的库仑破裂应力变化有利于断裂带附近余震及后续地震的发生. 由于库仑破裂应力变化与余震及后续地震有很好的相关性,从而可以通过计算静态库仑应力变化对后续地震趋势进行评估.

目前,对于汶川地震所造成的静态库仑破裂应力变化情况,众多学者开展了大量的研究,并对周围断层的地震危险性进行分析. Parsons *et al.* (2008)利用 USGS 给出的汶川地震破裂模型计算汶川地震对周围断层的应力触发,发现雅安断裂的库仑破裂应力增加可达 0.1 MPa. Toda *et al.* (2008)研究认为鲜水河断裂南端、东昆仑断裂以及岷江断裂地震危险性增加. Wan and Shen(2010)利用 GPS、InSAR 资料反演的汶川地震破裂模型,用 Okada 程序计算了周围断层的库仑破裂应力变化,结果表明龙

门山断裂带两端、鲜水河南端、东昆仑东南段、岷江南段以及西秦岭等断裂带应力增加。单斌等(2009)利用 PSGRN/PSCMP 软件,计算汶川地震所导致的应力场变化,结果表明鲜水河断裂北西段、龙日坝断裂、东昆仑断裂玛曲—南坪段、岷江断裂南段受汶川地震的影响较为显著。邵志刚等(2010)应用 Burgers 体黏滞松弛模型计算了汶川地震引起的库仑应力动态演化,并结合背景地震发生率最终给出了 4 条断裂的地震发生概率。

需要指出的是,目前的研究大多是利用均匀弹性位错模型计算震后静态应力场的变化,该模型对于模拟地震之后较短时间间隔内应力应变场是一种较好的近似,且能够快速较好地判定余震的分布趋势,但在地壳介质的非均匀性处理以及源于脆性上地壳与粘弹性下地壳和上地幔的耦合粘弹性松弛效应的考虑方面存在不足(Nur *et al.*, 1974)。其次为初始应力场的问题,因为地震前后的剪应力变化与背景应力场偏应力相关(石耀霖和曹建玲, 2010; 周仕勇, 2008)。King *et al.* (1994)发现初始应力场不仅使得地震发生后断层面上的应力状态更为复杂,而且还会影响库仑应力的分布。另外,采用接触问题的粘弹性模型研究断裂带的应力状态,接触问题具有高度非线性,初始应力场的存在及分布格局将直接影响断层面的接触状态。

该文综合考虑活动地块、地球物理、大地测量、地震活动性等多学科资料,建立川西藏东地区的三维粘弹性有限元模型。以 GPS 观测资料作为主要约束条件,考虑地形差异与粘弹性松弛等因素的影响,研究汶川地震的发生对周围断层应力场的影响。

2 川西藏东地区三维粘弹性有限元模型

2.1 活动断裂与地质模型

依据青藏高原及其周边活动构造的分布以及活动地块的划分结果(张培震等, 2003),考虑到该文开展数值模拟工作的需要,笔者选取对该区影响较大的主要活动断裂带作为研究对象,建立研究区的地质模型。为避免模型的边界效应对模拟结果的影响,最终确定目标区的范围(图 1):南部边界位于 26°N ,北部边界位于 37°N ,西部边界位于 90°E ,东部边界位于 108°E 。模型中包括的主要活动断裂带有:昆仑山口西—江错断裂、东昆仑断裂、龙日坝断裂、岷江断裂、虎牙断裂、龙门山断裂、甘孜—玉树—风火山断裂、鲜水河断裂、安宁河断裂以及则木河断裂,各条断裂带的

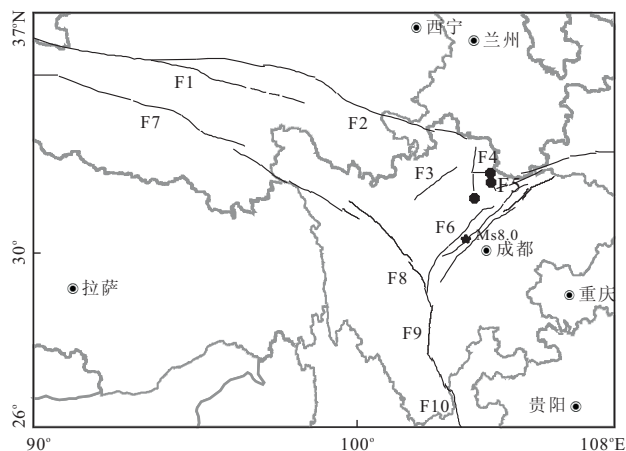


图 1 川西藏东地区地质构造模型简图

Fig. 1 Sketchy geological model in the western Sichuan and eastern Tibet regions

F1. 昆仑山口—江错断裂; F2. 东昆仑断裂; F3. 龙日坝断裂; F4. 岷江断裂; F5. 虎牙断裂; F6. 龙门山断裂; F7. 甘孜—玉树—风火山断裂; F8. 鲜水河断裂; F9. 安宁河断裂; F10. 则木河断裂; ● $M_s > 7.0$

几何参数(走向、倾向、倾角、活动性质等,表 1)则主要依据该区的相关研究成果(唐荣昌和韩渭滨, 1993; 刘光勋, 1996; 徐锡伟等, 2008)。

活动断裂在地质构造运动中起着非常重要的作用,在以往的数值模拟计算中,通常把活动断裂处理为强度较小、可塑性较强的弱化带,如此处理无法模拟活动断裂的滑动摩擦特征。为了在有限元模型中更好地模拟活动断裂,该文采用接触摩擦分析理论处理活动断裂带,这样既可以模拟间断面,也能够模拟断层面上存在的接触摩擦机制。相对于弱化带单元,接触摩擦处理更加接近真实的活动断裂。但是,接触摩擦分析是高度非线性,因此面临因收敛困难而导致计算代价较高等问题。

2.2 三维有限元模型

在地质模型的基础上,建立了较为精细的三维粘弹性有限元模型(图 2),对于地表起伏的处理,主要依据 SRTM 高程数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/>)。有限元模型在纵向上分为 5 层,分别对应地表、上地壳、中地壳、下地壳和上地幔(表 2)。该文使用中国地震局地壳应力研究所地壳动力学数值模拟实验室的 ANSYS12.1 软件开展数值模拟计算,模型共划分为单元 141 527 个、节点 135 547 个。对于龙门山断裂带的处理,笔者采用铲状断裂面来模拟其结构形态,这种几何形态有利于应变能积累,从而形成破坏性巨大的地震(张培震等, 2008)。

由于大地震的孕育过程一般需要数百至数千年乃至更长的时间,在孕震过程中,岩石的应力一应变

表 1 主要活动断裂几何参数

Table 1 Geometric parameters of the major active faults

断裂名称	走向	倾向	倾角	活动性质
鲜水河断裂(西北段)	N40°W	NE/SW	陡	左旋走滑
鲜水河断裂(南东段)	N20°W	NE/SW	60°~80°	左旋走滑
昆仑山口—江错断裂	EW	N/S	陡	左旋逆走滑
甘孜—玉树—风火山断裂	NW	NE	陡	左旋走滑
东昆仑断裂	NWW	NE/SW	55°~85°	左旋逆走滑
龙门山断裂	N45°E	NW	65°(上), 25°(下)	右旋逆走滑
安宁河断裂	NS	E/W	陡	左旋逆走滑
则木河断裂	N25°W	SW	60°~70°	左旋逆走滑
龙日坝断裂	N60°E	NW	陡	右旋走滑
岷江断裂	NS	E/W	70°~80°	左旋逆走滑
虎牙断裂	NNW	E/W	陡	左旋走滑

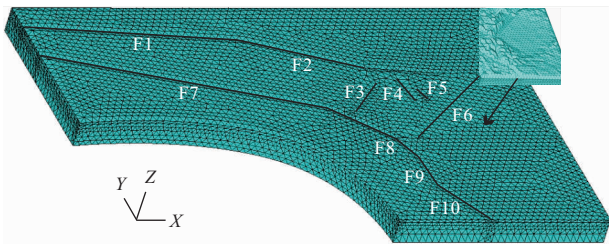


图 2 川西—藏东地区三维有限元模型

Fig. 2 Three dimensional discretization model in the target zone
F1~F10 为活动断裂带; 右上图为模型局部高程放大 5 倍的结果

积累在一定程度上表现为流变体的积累过程. 因此, 考虑介质的流变性质是必须的. 以往的相关研究中, 多采用 Maxwell 体或幂次律流体. Maxwell 体的松弛特征和蠕变特征均表现出类似流体的性质, 或者应力随时间减小至零, 或者应变随时间无限增大, 与地壳介质可能的流变特征不符. 而幂次律流体作为一种非线性流变本构关系, 收敛代价较高. 本模型不但采用粘弹性本构关系, 且采用接触摩擦分析单元处理活动断裂, 模型表现为高度非线性, 故本研究中采用标准线性固体. 标准线性固体为一个弹簧与一 Kelvin 体串联或一个弹簧与一 Maxwell 体的并联 (尹祥础, 1985).

由模型理论可以得到其微分形式的本构关系, 如下:

$$\sigma + p_1 \dot{\sigma} = q_0 \epsilon + q_1 \dot{\epsilon},$$

其中: $p_1 = \eta / (E_1 + E_2)$, $q_0 = E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$, $q_1 = E_1 \cdot \eta / (E_1 + E_2)$, $\tau = q_1 / q_0 = \eta / E_2$, E_1, E_2 为杨氏模量, η 为粘滞系数.

标准线性固体的蠕变方程为:

$$\epsilon = \frac{\sigma_0}{q_0} \left[1 - \left(1 - \frac{p_1 q_0}{q_1} \right) e^{-t/\tau} \right].$$

标准线性固体的松弛方程为:

$$\sigma = q_0 \epsilon_1 (1 - e^{-t/p_1}) + \frac{q_1}{p_1} \epsilon_1 e^{-t/p_1}.$$

从图 3a 蠕变曲线可以看出, 当 $t=0$ 时受到一个应力作用, 应变发生突跃; $t>0$ 之后, 应力保持不变, 应变随时间增加, 但其增加速率逐渐减小, 当时间趋于无穷时, 应变趋于一个有限的渐进值, 而不是像 Maxwell 体趋于无穷大. 而对于松弛特征 (图 3b), 当 $t=0$ 时受到一个应变作用时, 应力发生突跃; $t>0$ 之后, 应变保持不变, 应力随时间逐渐松弛, 但其松弛速率逐渐减小, 当时间趋于无穷时, 最终趋于一个有限渐进值, 而不像 Maxwell 体趋于 0. 作为一种具有流变性质的固体介质, 标准线性固体比 Maxwell 体更接近实际材料的流变性质.

2.3 介质分区及边界约束

依据活动地块分区及青藏高原、四川地区波速结构的研究成果 (Huang *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2007; 朱介寿, 2008), 根据杨氏模量 E 与泊松比 ν 、纵波速率 C 和密度 ρ 之间的关系: $E = [C^2 \rho (1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)] / (1 - \nu)$ (王仁等, 1980), 确定各分区的物性参数, 粘滞系数的选取主要依据该区已有的相关研究成果 (石耀霖和曹建玲, 2008; 张晁军等, 2008). 对于模型中断裂带物性参数的选取, 笔者选取断层杨氏模量为周围介质杨氏模量平均值的 1/3, 泊松比较两侧介质稍大. 基于纵向分层、横向分区的原则, 整个模型共分为 26 个区 (表 2).

川西藏东地区地壳运动模式主要受青藏高原物质东流、介质不均匀性及深部作用的影响, 其中高原物质东流是影响区域地壳运动的主要因素. 20 世纪 80 年代以来, GPS 观测提供了高精度、大范围、准实时的地壳运动定量数据, 使得在短时间内获得地壳

表 2 地壳上地幔介质模型参数

Table 2 Material properties of the crust and upper mantle media

分层	厚度(km)	介质分区	杨氏模量 $E(10^4 \text{ MPa})$	泊松比 ν	黏性系数 $\eta(10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s})$
地表	0~5	1	6.08	0.25	100
		2	2.03	0.25	100
		3	8.10	0.25	100
		4	8.37	0.25	100
上地壳	5~16	5	8.65	0.25	100
		6	2.70	0.26	100
		7	2.74	0.26	100
		8	2.90	0.26	100
		9	7.70	0.26	1
		10	8.97	0.25	10
中地壳	16~30	11	9.56	0.25	10
		12	2.57	0.28	1
		13	2.77	0.28	1
		14	2.88	0.28	1
		15	10.5	0.28	10
		16	11.6	0.26	10
下地壳	30~65	17	14.4	0.26	10
		18	3.50	0.30	10
		19	3.67	0.30	10
		20	4.33	0.30	10
		21	14.9	0.30	10
		22	16.5	0.28	10
上地幔	65~100	23	18.6	0.26	10
		24	4.97	0.35	10
		25	5.23	0.35	10
		26	5.57	0.35	10

断裂带:摩擦系数 0.4, 龙门山断裂带取 0.6; 内聚强度 40 MPa

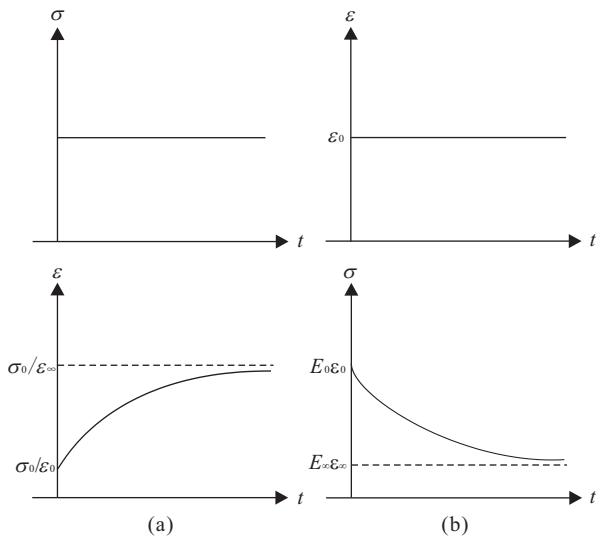


图 3 标准线性固体蠕变曲线(a)与松弛曲线(b)

Fig. 3 Creep (a) and relaxation (b) curves of the standard linear solid body

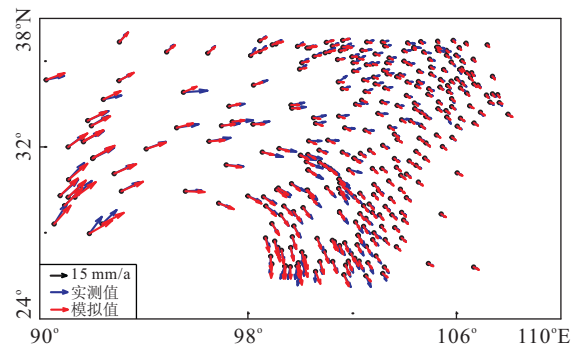


图 4 2004—2007 年 GPS 实测值与模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between 2004—2007 GPS measurement and the predicted in model

形的图像一致,因此可以采用 GPS 观测结果确定模型的边界约束条件(Royden et al., 2008). 该文利用 ITRF2000 参考框架(江在森等, 2003)处理得到的中国大陆 2004—2007 年的 GPS 观测资料,通过对速度场进行插值给出位移边界约束. 由于深部运动速度与 GPS 速率之间的差异尚未明确定论,作为一种近似,该文所施加的边界条件不随深度变化,且模

运动的速度场成为可能. 已有的研究表明, GPS 给出的现今川西地区地壳运动图像与晚第四纪构造变

型底部水平向自由,法向约束.

2.4 模型合理性检验

数值模拟计算中,模型的合理性及观测数据的可靠性检验是开展计算的重要环节.从以往的研究来看,此环节往往被忽视.从图 4 GPS 实测值与模拟结果的对比可以看出,数值模拟结果较好地反映出川西藏东地区地壳运动速度南强北弱、西强东弱的特点,且位移方向同时揭示出该区存在顺时针旋转的特征.除川青、甘交界区域差别较大外,大部分点在运动方向、速度大小上吻合较好,对于部分点存在较大差异的原因,分析认为可能与局部区域的特殊构造有关;另外,差异也可能来源于 GPS 实测资料自身的误差.

3 断裂带库仑破裂应力年累积速率

3.1 库仑破裂应力公式

根据库仑破裂准则,当断层面上剪应力超过岩石的抗剪强度时,断层面将发生剪切破裂. Harris *et al.* (1998)定义库仑破裂应力变化 $\Delta\sigma_f$ 为:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta p),$$

式中: μ 为摩擦系数; $\Delta\tau$ 为断层面上剪应力的变化(以断层滑动方向为正); $\Delta\sigma_n$ 和 Δp 分别为断层面上正应力和孔隙压力的变化,张性为正.如果 $\Delta\sigma_f > 0$,则有利于后续地震的发生.

为了简化孔隙压力变化的影响,引入 Skempton 系数 B' ,取值范围为 $0\sim 1$, B' 依赖于岩石体膨胀系

数和流体所占体积比例的常数,则 $\Delta p = B'\Delta\sigma_{sk}/3$.假定断层处比周围岩石更具有延展性,则 $\Delta\sigma_n = \Delta\sigma_{sk}/3$,并假定 $\mu' = \mu(1 - B')$ (Rice, 1992),库仑破裂应力变化 $\Delta\sigma_f$ 变为:

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n.$$

3.2 库仑破裂应力累积速率

通过实施重力载荷,获得区域的初始应力场.在初始应力场的基础上,加载千年尺度的构造载荷,获得区域的应力场分布特征.通过数值模拟得到的任意点应力张量的 6 个独立分量,既可以研究应力场的主应力和主方向,也可以计算任一走向、任一倾向断层面上应力向量,即正应力 σ_n 和剪应力 τ .对于二维问题,有简明的计算公式,而三维问题则比较复杂,可以通过张量变换获得任意断面上的应力向量,最终给出断裂带的库仑应力累积速率(陈连旺等,2001).根据 King *et al.* (1994)的结果认为,改变 μ' 的值对计算得到的库仑破裂应力变化的空间分布影响不大,但对应力的大小有一定的影响.该文给出视摩擦系数 $\mu' = 0.4$ 时上地壳主要活动断裂带的库仑破裂应力累积速率(图 5).

从图 5 上可以看出,昆仑山口—江错断裂带、甘孜—玉树—风火山断裂、鲜水河断裂带以及则木河断裂带,库仑应力的年累积速率相对较大,最大达 1.6×10^{-3} MPa/a,而对于单条断裂而言,昆仑山口—江错断裂带、甘孜—玉树—风火山断裂带南东段水平高于北西段;鲜水河断裂带北西段水平相对较高,这种高水平的库仑破裂应力年累积速率与断裂带历史强震活动频发,即特征地震复发周期较短

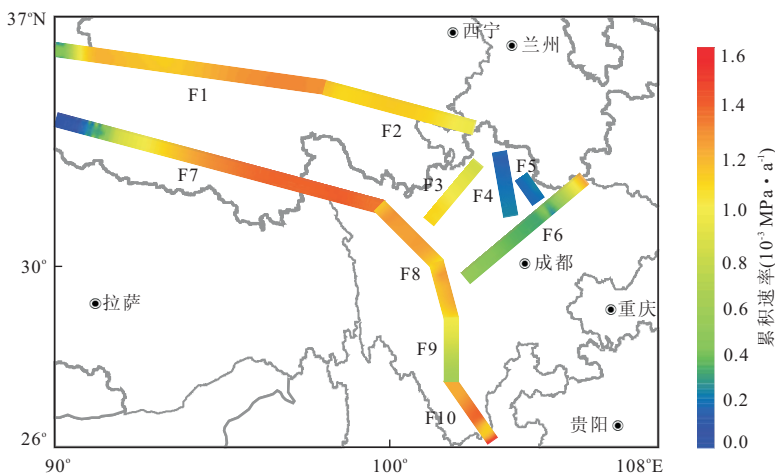


图 5 上地壳主要活动断裂带库仑破裂应力累积速率

Fig. 5 Coulomb failure stressing rate of the mainly active faults in the bottom of upper crust

F1. 昆仑山口—江错断裂;F2. 东昆仑断裂;F3. 龙日坝断裂;F4. 岷江断裂;F5. 虎牙断裂;F6. 龙门山断裂;F7. 甘孜—玉树—风火山断裂;F8. 鲜水河断裂;F9. 安宁河断裂;F10. 则木河断裂

是基本一致的. 东昆仑断裂带、龙日坝断裂带, 应力累积速率处于中等水平, 为 $0.54 \sim 1.16 \times 10^{-3}$ MPa/a. 对于单条断裂而言, 东昆仑、龙日坝以及鲜水河断裂带南东段应力水平相当, 而安宁河断裂北西段较南东段相对较高. 此外, 岷江断裂带、龙门山断裂带、安宁河断裂带以及虎牙断裂南段年累积速率较小. 龙门山断裂带年累积速率达 $0.28 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3}$ MPa/a, 这种较小的累积速率使得在龙门山断裂带上发生较大强度的地震需要较长时间尺度的应力积累, 这与前人关于龙门山断裂带强震长复发周期的研究结果是一致的.

4 汶川地震的发生造成周围断层库仑破裂应力变化

用地震波资料快速测定的破裂结果, 分析地震发生对周围断层产生的同震静态库仑破裂应力变化, 对于快速判定未来的强震分布趋势、地震危险区以及探讨余震或后续破裂事件与主震之间的关系具有重要意义. 汶川地震发生后, 不同研究小组分别给出了断层上的破裂分布 (Chen, 2008; 王卫民等, 2008; Ji and Hayes, 2008; Nishimura *et al.*, 2008; Sladen, 2008), 虽然这些结果在细节上略有差别, 但均反映出该地震为破裂自西南向东北方向传播的破裂, 西南部以逆冲为主、东北部以走滑为主. 该文以 Ji and Hayes (2008) 根据有限断层模型方法反演出的断裂带同震静态滑动量的结果作为约束条件 (图 6), 模拟汶川地震的发震过程, 时间尺度为 100 s, 最后考虑粘弹性松弛效应因素的影响下, 研究汶川地震的发生造成周围断裂带应力场的变化.

从图 7 可以看出, 就龙门山断裂带自身而言, 汶川地震的发生造成断裂带东北段出现不同程度的应力增加, 对比不同研究人员应用双差定位方法关于震后不同时间尺度内的余震精定位结果来看 (Huang *et al.*, 2008; 陈九辉等, 2009; Zhao *et al.*, 2011), 余震震源的优势深度为 10~20 km, 且余震主要分布在汶川主震以东的龙门山断裂带东北段, 这与库仑应力的变化基本吻合. 断层面上库仑破裂应力的变化与静态位移量的分布存在一定的关系, 静态位移量的高值区对应库仑破裂应力减小的区域. 对于其他断裂而言, 汶川地震的发生造成鲜水河断裂北西段、东昆仑断裂、虎牙断裂、龙日坝断裂、岷江断裂库仑破裂应力显著增加, 其中鲜水河断裂带北西段增加 $0.07 \sim$

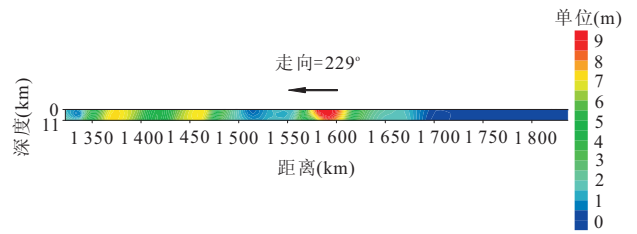


图 6 断层面上静态位移量分布结果(据 Ji and Hayes, 2008 数据绘制)

Fig. 6 Distribution of the co-seismic displacement in the seismogenic fault

0.14 MPa; 而昆仑山口西—江错断裂、甘孜—玉树—风火山断裂、则木河断裂则存在微弱的增加. 然而 2011 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 就发生在甘孜—玉树—风火山断裂上, 汶川地震的发生对其有一定的触发效应. 应力减小较为显著的除龙门山断裂的断层破裂段外, 鲜水河断裂南段以及安宁河断裂均表现为不同程度的库仑破裂应力减小, 鲜水河断裂南段减小 0.3 MPa. 从库仑破裂应力变化的总体特征来看, 龙门山断裂以北的断裂整体上处于增加的状态, 而以南则出现不同程度的减小.

汶川地震发生后, 关于其是否强震复发, 即是否属于特征地震类型, 根据冉勇康等 (2008)、郑文俊 (2008) 的研究认为, 从已开挖的探槽来看, 无论中央断裂还是前山断裂均显示有包括 5·12 汶川地震在内的至少 2 次大小相近的地震事件. Ran *et al.* (2010) 根据已有的部分测量结果、断错地貌分析和历史地震记录, 初步认为映秀—北川断裂最早一次古地震事件发生在 5 730 aBP, 距离汶川较近的一次大约发生在 2 600 aBP, 平均复发周期为 $2 800 \pm 200$ a. 张培震等 (2008) 利用 GPS 滑动速率, 得出地震复发周期在 3 190~5 952 a 之间; 利用地震地质滑动速率, 得出地震复发周期在 2 233~4 167 a 之间, 可以说龙门山断裂带的强震复发周期在 2 233~5 952 a 之间, 考虑到整个估算过程的不确定性, 其复发周期可以进一步概括为 2 000~6 000 a. Shen *et al.* (2009) 利用同震位移量及 GPS、断裂带滑动速率等资料给出龙门山断裂带的复发周期约 4 000 a. 谢富仁等 (2008) 利用地质学、地震学和 GPS 数据分析, 估算龙门山断裂带 $M_s 8.0$ 级地震的平均复发间隔为 3 000 a. 任俊杰等 (2009) 利用断错地貌、地震矩率和活动速率 3 种方法, 分别估算了龙门山断裂带的大震复发间隔为 3 000~6 000 a. 李勇等 (2006) 通过探槽研究, 认为龙门山断裂带单条断

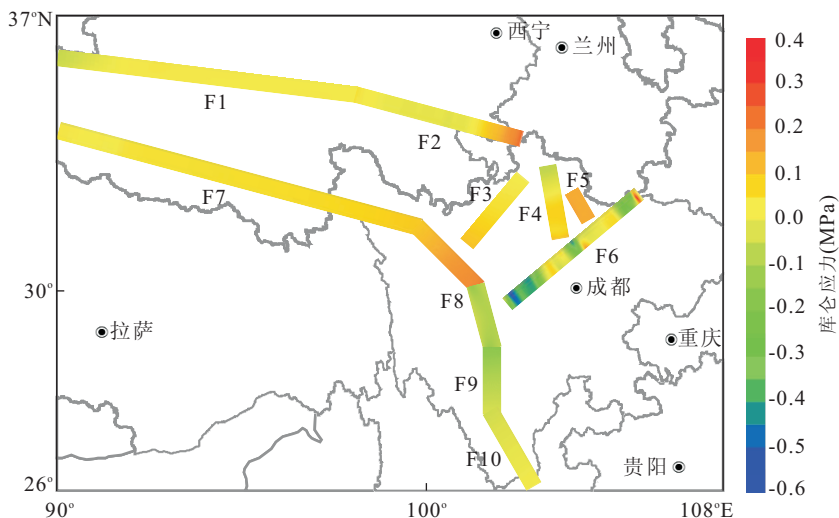


图 7 汶川地震的发生造成周围主要断层的库仑应力变化

Fig. 7 Coulomb stress change on major faults caused by the Wenchuan earthquake

F1. 昆仑山口—江错断裂; F2. 东昆仑断裂; F3. 龙日坝断裂; F4. 岷江断裂; F5. 虎牙断裂; F6. 龙门山断裂; F7. 甘孜—玉树—风火山断裂; F8. 鲜水河断裂; F9. 安宁河断裂; F10. 则木河断裂

裂的强震复发周期至少为 2 000~3 000 a. Densmore *et al.* (2007) 认为映秀—北川断裂在 12 000~13 000 a 以来发生过一次地表破裂事件. Burchfiel *et al.* (2008) 根据地震波反演的同震位移和 GPS 速率, 认为映秀—北川断裂带上 8 级地震的复发间隔为 2 000~10 000 a. 朱守彪等(2009) 应用 2-D 粘弹性有限元数值模拟方法, 给出了龙门山断裂带上地震的平均复发周期为 3 163 a. 该文结合汶川地震同震库仑破裂应力变化(0.6 MPa) 和断裂带库仑应力年累积速率($0.28 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3}$ MPa/a) 的结果, 估算龙门山断裂带大震复发周期约为 1 714~2 143 a, 这与前人应用古地震、GPS 滑移速率、地震地质及同震位错等方法给出的结果基本一致.

5 鲜水河断裂带强震活动性研究

分析前人和该文关于汶川地震的发生对周围区域应力场影响的研究成果 (Parsons *et al.*, 2008; Toda *et al.*, 2008), 认为汶川地震造成鲜水河断裂带北西段库仑破裂应力增加. 那么断裂带位置下一次地震何时发生, 汶川地震对其影响如何, 越来越引起公众的关注. 该文以鲜水河断裂为例, 结合同震应力变化和应力累积速率的研究结果, 进一步分析汶川地震的发生对鲜水河断裂带强震活动性的影响.

鲜水河断裂带作为川滇菱形块体北部边界一条晚第四纪强烈活动的大型左旋走滑活动断裂带, 强

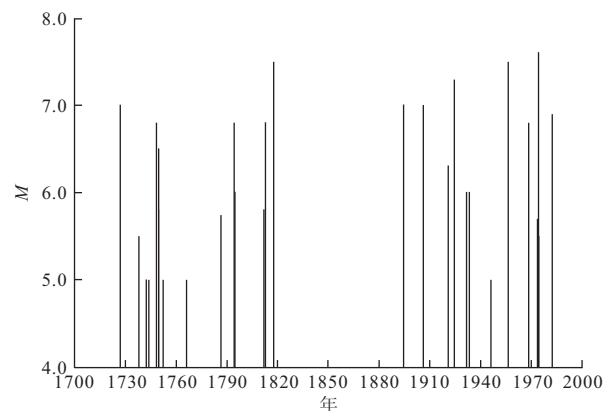


图 8 鲜水河断裂带北西段上强震活动

Fig. 8 Seismic activity in northwestern segment of Xianshuihe fault

震活动频发, 自 1700 年以来发生 $M \geq 6.0$ 级地震 22 次, 其中 $M \geq 7.0$ 级地震 8 次. 根据以往对鲜水河断裂带强震复发行为的研究成果 (闻学泽, 1995; 周荣军等, 2001; 易桂喜等, 2002; 冉洪流和何宏林, 2006), 认为强震的复发行为具有准周期性, 且鲜水河断裂带北西段 $M \geq 6.7$ 强震复发间隔在 100~150 a 左右. 从鲜水河断裂带北西段上地震活动 (图 8) 可以看出, 在经历系列强震后, 从 1817 年开始进入 76a 的相对平静期, 直至 1893 年道孚—乾宁 $M7.2$ 级地震的发生, 此后鲜水河断裂带重新进入强震活跃阶段, 持续到 1981 年道孚 $M6.9$ 地震, 大约 88 a. 而从道孚地震后, 鲜水河断裂带强震活动水平相对较弱, 或许进入新一轮的平静期. 结合鲜水河断裂带同震

库仑破裂应力变化(0.07~0.14 MPa)和库仑破裂应力累积速率(1.35×10^{-3} MPa/a)的研究结果,最终给出汶川地震的发生造成鲜水河断裂带强震复发间隔缩短约 52~104 a. 因此,库仑破裂应力累积速率的研究结果可以作为未来中强震活动趋势判定和地震危险性评估的参考依据。

6 结论与讨论

利用三维粘弹性有限元模型,在充分考虑地形差异与粘弹性松弛等因素的前提下,计算了川西藏东地区主要活动断裂带库仑应力累积速率,并分析汶川地震的发生对周围区域主要活动断层的影响。结果显示,川西藏东地区活动断裂带库仑应力累积速率差异显著,对于龙门山断裂带而言,断裂带累积速率为 $0.28 \times 10^{-3} \sim 0.35 \times 10^{-3}$ MPa/a,这种较小的累积速率使得在龙门山断裂带上发生较大强度的地震需要较长时间尺度的应力积累,这与前人关于汶川地震长复发周期的研究结果是一致的。汶川地震的发生除造成震源区同震库仑破裂应力减小外,还增加了龙门山断裂两端、东昆仑断裂、鲜水河断裂北西段、龙日坝断裂、岷江断裂、虎牙断裂上库仑应力水平,尤其是龙门山断裂带北东段,这与震后较强的余震分布基本吻合。断层面上库仑破裂应力的变化与静态位移量的分布存在一定的关系,静态位移量的高值区对应库仑破裂应力减小的区域。结合汶川地震同震应力变化和应力年累积速率的研究结果,给出汶川地震的大震复发周期约为 1 714~2 143 a. 该结果与前人应用古地震、地震地质、GPS 以及同震位移等给出的结果具有一致性。此外,以川滇菱形块体北部的鲜水河断裂带为例,进一步分析汶川地震对鲜水河断裂带强震活动习性的影响,认为地震的发生造成断裂带强震复发间隔缩短约 52~104 a,是未来值得重点关注的强震危险区。

该文从应力场角度出发,考虑地形差异与震后粘弹性松弛效应等因素的影响下,获得汶川地震发生对周围断层影响方面的研究成果。需要说明的是,限于资料的限制,仅利用 Ji and Hayes(2008)给出的同震静态滑移量结果作为约束条件模拟汶川地震的发震过程,而对于震后余滑效应的影响以及利用多个地震破裂模型计算库仑应力和探讨不同模型之间结果的差异,通过多模型结果的比对,对解释未来的强震或余震危险区以及地震危险性分析或许更有说服力。

致谢:在该文完成过程中,中国地震局第一监测中心的李廷兴研究员提供中国大陆 GPS 观测数据,UCSB Ji C 公开提供汶川地震同震滑移量研究结果,在此表示感谢。

References

- Burchfiel, B. C., Chen, Z., Liu, Y., et al., 1995. Tectonics of the Longmen Shan and Adjacent Regions, Central China. *International Geology Review*, 37(8): 661–735. doi:10.1080/00206819509465424
- Burchfiel, B. C., Royden, L. H., Hilst, R. D., et al., 2008. A Geological and Geophysical Context for the Wenchuan Earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18(7): 4–11. doi:10.1130/GSATG18A.1
- Chen, J. H., Liu, Q. Y., Li, S. C., et al., 2009. Seismotectonic Study by Location of the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake Sequence. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 390–397 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. W., Lu, Y. Z., Liu, J., et al., 2001. Three Dimensional Viscoelastic Simulation on Dynamic Evolution of Stress Field in North China Induced by the 1966 Xingtai Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 23(5): 480–491 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. W., Zhang, P. Z., Lu, Y. Z., et al., 2008. Numerical Simulation of Loading/Unloading Effect on Coulomb Failure Stress among Strong Earthquakes in Sichuan-Yunnan Area. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1411–1421 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. T., 2008. On the Magnitude and the Fault Length of the Great Wenchuan Earthquake. *Science and Technology Review*, 26(10): 26–27 (in Chinese with English abstract).
- Deng, J. S., Sykes, L. R., 1996. Triggering of 1812 Santa Barbara Earthquake by a Great San Andreas Shock; Implication for Future Seismic Hazard in Southern California. *Geophys. Res. Lett.*, 23(10): 1155–1158. doi:10.1029/96GL00738
- Deng, J. S., Sykes, L. R., 1997. Evolution of the Stress Field in Southern California and Triggering of Moderate-Size Earthquakes: A 200-year Perspective. *J. Geophys. Res.*, 102(B5): 9859–9886. doi:10.1029/96JB03897
- Densmore, A. L., Ellis, M. A., Li, Y., et al., 2007. Active Tectonics of the Beichuan and Pengguan Faults at the Eastern Margin of the Tibetan Plateau. *Tectonics*, 26(4): 1–17. doi:10.1029/2006TC001987
- Harris, R. A., 1998. Introduction to Special Section: Stress

- Triggers, Stress Shadows, and Implication for Seismic Hazard. *J. Geophys. Res.*, 103 (B10): 24347—24358. doi: 10.1029/98JB01576
- Huang, Y., Wu, J. P., Zhang, T. Z., et al., 2008. Relocation of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake and Its Aftershock Sequence. *Science in China (Series D)*, 51(12): 1703—1711. doi:10.1007/s11430-008-0135-z
- Huang, Z. X., Su, W., Peng, Y. J., et al., 2003. Rayleigh Wave Tomography of China and Adjacent Regions. *J. Geophys. Res.*, 108 (B2): 1—10. doi: 10.1029/2001JB001696
- Ji, C., Hayes, G., 2008. Preliminary Result of the May 12, 2008 M_w 7.9 Eastern Sichuan, China Earthquake. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php.
- Jiang, Z. S., Ma, Z. J., Zhang, X., et al., 2003. Horizontal Strain Field and Tectonic Deformation of China Mainland Revealed by Preliminary GPS Result. *Chinese J. Geophys.*, 46 (3): 352—358 (in Chinese with English abstract).
- Kan, R. J., Zhang, S. C., Yan, F. T., et al., 1977. Present Tectonic Stress Field and Its Relation to the Characteristics of Recent Tectonic Activity in Southwestern China. *Chinese J. Geophys.*, 20 (2): 96—109 (in Chinese with English abstract).
- King, G. C. P., Stein, R. S., Lin, J., 1994. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 84(3): 935—953.
- Li, Y., Zhou, R. J., Densmore, A., et al., 2006. Continental Dynamics Process and Geological Response in the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, Y. X., Zhang, J. H., Zhou, W., et al., 2009. The Mechanism and Dynamics of the Generation and Occurrence for Wenchuan M_s 8.0 Earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 519—530 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. X., 1996. Eastern Kunlun Active Fault Zone and Its Seismic Activity. *Earthquake Research in China*, 12(2): 119—126 (in Chinese with English abstract).
- Molnar, P., Deng, Q. D., 1984. Faulting Associated with Large Earthquakes and the Average Rate of Deformation in Central and Eastern Asia. *J. Geophys. Res.*, 89 (B7): 6203—6227. doi:10.1029/JB089iB07p06203
- Nishimura, N., Yagi, Y., 2008. Rupture Process for May 12, 2008 Sichuan Earthquake (Ver. 2). <http://www.geol.tsukuba.ac.jp/~nismura/20080512/>
- Nur, A., Mavko, G., 1974. Postseismic Viscoelastic Rebound. *Science*, 183(4121): 204—206. doi:10.1126/science.183.4121.204
- Okada, Y., 1992. Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 82 (2): 1018—1040.
- Parsons, T., Ji, C., Kirby, E., 2008. Stress Changes from the 2008 Wenchuan Earthquake and Increased Hazard in the Sichuan Basin. *Nature*, 454(7203): 509—510. doi: 10.1038/nature07177
- Ran, H. L., He, H. L., 2006. Research on the Magnitude and Recurrence Interval of Characterized Earthquakes with Magnitude ≥ 6.7 along the Northwestern Portion of the Xianshuihe Fault Zone in Western Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.*, 49 (1): 153—161 (in Chinese with English abstract).
- Ran, Y. K., Chen, L. C., Chen, G. H., et al., 2008. Primary Analyses of in-Situ Recurrence of Large Earthquake along Seismogenic Fault of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. *Seismology and Geology*, 30 (3): 630—643 (in Chinese with English abstract).
- Ran, Y. K., Chen, L. C., Chen, J., et al., 2010. Paleoseismic Evidence and Repeat Time of Large Earthquake at Three Sites along the Longmenshan Fault Zone. *Tectonophysics*, 491(1—4): 141—153. doi:10.1016/j.tecto.2010.01.009
- Ren, J. J., Zhang, S. M., Ma, B. Q., et al., 2009. Characteristics and Recurrence Intervals of Large Earthquakes along the Middle-Northern Segment of the Longmenshan Fault Zone. *Acta Seismologica Sinica*, 31(2): 160—171 (in Chinese with English abstract).
- Rice, J. R., 1992. Fault Stress States, Pore Pressure Distributions and the Weakness of the San Andreas Fault, Fault Mechanics and Transport Properties of Rock. Academic, San Diego, Calif., 475—503.
- Royden, L. H., Burchfiel, B. C., Van der, Hilst, R. D., 2008. The Geological Evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321 (5892): 1054—1058. doi: 10.1126/science.1155371
- Shan, B., Xiong, X., Zheng, Y., et al., 2009. Stress Changes on Major Faults Caused by M_w 7.9 Wenchuan Earthquake, May 12, 2008. *Science in China (Series D)*, 39 (5): 537—545 (in Chinese with English abstract).
- Shao, Z. G., Zhou, L. Q., Jiang, C. S., et al., 2010. The impact of Wenchuan M_s 8.0 Earthquake on the Seismic Activity of Surrounding Faults. *Chinese J. Geophys.*, 53 (8): 1784—1795 (in Chinese with English abstract).
- Shen, Z. K., Sun, J. B., Zhang, P. Z., et al., 2009. Slip Maxima at Fault Junctions and Rupturing of Barriers during the 2008 Wenchuan Earthquake. *Nature Geoscience*, 2

- (10):718—724. doi: 10.1038/NGEO636
- Shen, Z. K., Wan, Y. G., Gan, W. J., et al., 2003. Viscoelastic Triggering among Large Earthquake along the East Kunlun Fault System. *Chinese J. Geophys.*, 46(6): 786—795 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. L., Cao, J. L., 2008. Effective Viscosity of China Continental Lithosphere. *Earth Science Frontiers*, 15(3): 82—95 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. L., Cao, J. L., 2010. Some Aspects in Static Stress Change Calculation—Case Study on Wenchuan Earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 53(1): 102—110 (in Chinese with English abstract).
- Sladen, A., 2008. Preliminary Result 05/12/2008 (M_w 7.9). <http://www.tectonics.caltech.edu/2008MayChinaEQ/sichuan.html>.
- 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. *Science*, 258(5086): 1328—1332.
- Stein, R. S., Lisowski, M., 1983. The 1979 Homestead Valley Earthquake Sequence, California: Control of Aftershocks and Postseismic Deformation. *J. Geophys. Res.*, 88(B8): 6477—6490. doi: 10.1029/JB088iB08p06477
- Tang, R. C., Han, W. B., 1993. Active Faults and Earthquakes in Sichuan Province. Seismological Press, Beijing.
- Teng, J. W., Bai, D. H., Yang, H., et al., 2008. Deep Processes and Dynamic Responses Associated with the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1385—1402 (in Chinese with English abstract).
- Toda, S., Lin, J., Meghraoui, M., et al., 2008. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, Earthquake Calculated to Increase Failure Stress and Seismicity Rate on Three Major Fault Systems. *Geophys. Res. Lett.*, 35(L17305): 1—6. doi: 10.1029/2008GL034903
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., 2010. Static Coulomb Stress Changes on Faults Caused by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China Earthquake. *Tectonophysics*, 491: 105—118. doi: 10.1016/j.tecto.2010.03.017
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Sheng, S. Z., et al., 2010. The Mechanical Effects of the 2008 M_s 7.3 Yutian, Xinjiang Earthquake on the Neighboring Faults and Its Tectonic Origin of Normal Faulting Mechanism. *Chinese J. Geophys.*, 53(2): 280—289 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Zeng, Y. H., et al., 2007. Evolution of Cumulative Coulomb Failure Stress in Northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and Its Effect on Large Earthquake Occurrence. *Acta Seismologica Sinica*, 29(2): 115—129 (in Chinese with English abstract).
- Wan, Y. G., Shen, Z. K., Zeng, Y. H., et al., 2008. Study on Visco-Elastic Stress Triggering Model of the 1976 Tangshan Earthquake. *Acta Seismologica Sinica*, 30(6): 581—593 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. Y., Han, W. B., Wu, J. P., et al., 2007. Crustal Structure Beneath the Eastern Margin of the Tibetan Plateau and Its Tectonic Implications. *J. Geophys. Res.*, 112(B7): 1—21. doi: 10.1029/2005JB003873
- Wang, M., 2009. Coseismic Slip Distribution of the 2008 Wenchuan Great Earthquake Constrained using GPS Coseismic Displacement Field. *Chinese J. Geophys.*, 52(10): 2519—2526 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R., He, G. Q., Yin, Y. Q., et al., 1980. A Mathematical Simulation for the Pattern of Seismic Transference in North China. *Acta Seismologica Sinica*, 2(1): 32—42 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W. M., Zhao, L. F., Li, J., et al., 2008. Rupture Process of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.*, 51(5): 1403—1410 (in Chinese with English abstract).
- Wen, X. Z., 1995. Quantitative Estimates of Seismic Potential on Active Faults. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Wen, X. Z., Zhang, P. Z., Du, F., et al., 2009. The Background of Historical and Modern Seismic Activities of the Occurrence of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 444—454 (in Chinese with English abstract).
- Xie, F. R., Zhang, Y. Q., Zhang, X. L., 2008. Estimation of Wenchuan M_s 8.0 Earthquake Recurrence Interval. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 3(4): 337—344 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Chen, G. H., et al., 2008. Discovery of the Longriba Fault in Eastern of the Bayan Har Block and Its Tectonic Implications. *Science in China (Series D)*, 38(5): 529—542 (in Chinese with English abstract).
- Xu, X. W., Wen, X. Z., Ye, J. Q., et al., 2008. The M_s 8.0 Wenchuan Earthquake Surface Rupture and Its Seismogenic Structure. *Seismology and Geology*, 30(3): 597—629 (in Chinese with English abstract).
- Yi, G. X., Wen, X. Z., Xu, X. W., 2002. Study on Recurrence Behaviors of Strong Earthquakes for Several Entireties of Active Fault Zones in Sichuan-Yunnan Region. *Earthquake Research in China*, 18(3): 267—276 (in Chinese with English abstract).

- Yin, X. C., 1985. *Solid Mechanics*, Seismological Press, Beijing.
- Zhang, C. J., Cao, J. L., Shi, Y. L., 2008. Viscosity of Tibet Plateau in Lower Crust Deduced from the Post-Seismic Deformation. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1250—1257.
- Zhang, P. Z., Deng, Q. D., Zhang, G. M., et al., 2003. Active Tectonic Blocks and Strong Earthquakes in the Continent of China. *Science in China (Series D)*, 33(Suppl.): 12—20. (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Xu, X. W., Wen, X. Z., et al., 2008. Slip Rates and Recurrence Intervals of the Longmen Shan Active Fault Zone, and Tectonic Implications for the Mechanism of the May 12 Wenchuan Earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.*, 51(4): 1066—1073 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, B., Shi, Y. T., Gao, Y., 2011. Relocation of Aftershocks of the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake and Its Implication to Seismotectonics. *Earthq. Sci.*, 24(1): 107—113. doi: 10.1007/s11589-011-0774-6
- Zheng, W. J., Li, C. Y., Wang, W. T., et al., 2008. Trench Logs of Earthquake Scarp of the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake in the Segment North of Beichuan. *Seismology and Geology*, 30(3): 697—709 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, R. J., He, Y. L., Huang, Z. Z., et al., 2001. The Slip Rate and Strong Earthquake Recurrence Interval on the Qianning-Kangding Segment of the Xianshuihe Fault Zone. *Acta Seismologica Sinica*, 23(3): 250—261 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S. Y., 2008. Seismicity Simulation in Western Sichuan of China Based on the Fault Interactions and Its Implication on the Estimation of the Regional Earthquake Risk. *Chinese J. Geophys.*, 51(1): 165—174 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, J. S., 2008. The Wenchuan Earthquake Occurrence Background in Deep Structure and Dynamics of Lithosphere. *Journal of Chengdu University of Technology: Sci & Technol ED*, 35(4): 348—356 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, S. B., Zhang, P. Z., 2009. A Study on the Dynamical Mechanisms of the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 418—427 (in Chinese with English abstract).
- 390—397.
- 陈连旺, 陆远忠, 刘杰, 等, 2001. 1966年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟. *地震学报*, 23(5): 480—491.
- 陈连旺, 张培震, 陆远忠, 等, 2008. 川滇地区强震序列库仑破裂应力加卸载效应的数值模拟. *地球物理学报*, 51(5): 1411—1421.
- 陈运泰, 2008. 汶川特大地震的震级和断层长度. *科技导报*, 26(10): 26—27.
- 江在森, 马宗晋, 张希, 等, 2003. GPS初步结果揭示的中国陆地水平应变场与构造变形. *地球物理学报*, 46(3): 352—358.
- 阚荣举, 张四昌, 晏凤桐, 等, 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. *地球物理学报*, 20(2): 96—109.
- 李延兴, 张静华, 周伟, 等, 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震孕育发生的机制与动力学问题. *地球物理学报*, 52(2): 519—530.
- 李勇, 周荣军, Densmore, A., 等, 2006. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应. 北京: 地质出版社.
- 刘光勋, 1996. 东昆仑活动断裂带及其强震活动. *中国地震*, 12(2): 119—126.
- 冉洪流, 何宏林, 2006. 鲜水河断裂带北西段不同破裂源强震震级 ($M \geq 6.7$) 及复发间隔研究. *地球物理学报*, 49(1): 153—161.
- 冉勇康, 陈立春, 陈桂华, 等, 2008. 汶川 $M_s 8.0$ 地震发震断裂大地震原地重复现象初析. *地震地质*, 30(3): 630—642.
- 任俊杰, 张世民, 马保起, 等, 2009. 龙门山断裂带中北段大震复发特征与复发间隔估计. *地震学报*, 31(2): 160—171.
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 等, 2009. 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. *中国科学(D辑)*, 39(5): 537—545.
- 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 等, 2010. 2008汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层活动的影响. *地球物理学报*, 53(8): 1784—1795.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军, 等, 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. *地球物理学报*, 46(6): 786—795.
- 石耀霖, 曹建玲, 2008. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. *地学前缘*, 15(3): 82—95.
- 石耀霖, 曹建玲, 2010. 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*, 53(1): 102—110.
- 唐荣昌, 韩渭滨, 1993. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社.
- 滕吉文, 白登海, 杨辉, 等, 2008. 2008汶川 $M_s 8.0$ 级地震发

附中文参考文献

陈九辉, 刘启元, 李顺成, 等, 2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. *地球物理学报*, 52(2):

- 生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 51(5): 1385—1402.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 等, 2010. 2008 年新疆于田 7.3 级地震对周围断层的影响及其正断层机制的区域构造解释. 地球物理学报, 53(2): 280—289.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2007. 青藏高原东北部的库仑破裂应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 29(2): 115—129.
- 万永革, 沈正康, 曾跃华, 等, 2008. 唐山地震序列应力触发的黏弹性力学模型研究. 地震学报, 30(6): 581—593.
- 王敏, 2009. 基于 GPS 同震位移场约束反演 2008 年 5·12 汶川大地震破裂空间分布. 地球物理学报, 51(10): 2519—2526.
- 王仁, 何国琦, 殷有泉, 等, 1980. 华北地区地震迁移规律的数学模拟. 地震学报, 2(1): 32—42.
- 王卫民, 赵连峰, 李娟, 等, 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 51(5): 1403—1410.
- 闻学泽, 1995. 活动断裂地震潜势的定量评估. 北京: 地震出版社.
- 闻学泽, 张培震, 杜方, 等, 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震发生的历史与现今地震活动背景. 地球物理学报, 52(2): 444—454.
- 谢富仁, 张永庆, 张效亮, 2008. 汶川 M_s 8.0 级地震发震构造大震复发间隔估算. 震害防御技术, 3(4): 337—344.
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华, 等, 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. 中国科学(D 辑), 38(5): 529—542.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等, 2008. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597—629.
- 易桂喜, 闻学泽, 徐锡伟, 2002. 川滇地区若干活动断裂带整体的强地震复发特征研究. 中国地震, 18(3): 267—276.
- 尹祥础, 1985. 固体力学. 北京: 地震出版社.
- 张晁军, 曹建玲, 石耀霖, 2008. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数. 中国科学(D 辑), 38(10): 1250—1257.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等, 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块. 中国科学(D 辑), 33(增刊): 12—20.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等, 2008. 2008 年汶川 8.0 级地震发震断裂的滑动速率、复发周期和构造成因. 地球物理学报, 51(4): 1066—1073.
- 郑文俊, 李传友, 王伟涛, 等, 2008. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震陡坎(北川以北段)探槽的记录特征. 地震地质, 30(3): 697—709.
- 周荣军, 何玉林, 黄祖智, 等, 2001. 鲜水河断裂带乾宁—康定段的滑动速率与强震复发间隔. 地震学报, 23(3): 250—261.
- 周仕勇, 2008. 川西及邻近地区地震活动性模拟和断层间相互作用研究. 地球物理学报, 51(1): 165—174.
- 朱介寿, 2008. 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), 35(4): 348—356.
- 朱守彪, 张培震, 2009. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震发生过程的动力学机制研究. 地球物理学报, 52(2): 418—427.