

丰成君, 陈群策, 谭成轩, 吴满路, 秦向辉, 廖椿庭. 2013. 汶川  $M_s8.0$  地震对龙门山断裂带附近地应力环境影响初探——以北川、江油地区为例. 地震学报, 35(2): 137—150.

Feng Chengjun, Chen Qunce, Tan Chengxuan, Wu Manlu, Qin Xianghui, Liao Chunting. 2013. A preliminary study of the influence of Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake on in-situ stress state near Longmenshan fault zone: A case study in Beichuan and Jiangyou areas. *Acta Seismologica Sinica*, 35(2): 137—150.

## 汶川 $M_s8.0$ 地震对龙门山断裂带附近 地应力环境影响初探 ——以北川、江油地区为例<sup>\*</sup>

丰成君<sup>1),\*</sup> 陈群策<sup>1,2)</sup> 谭成轩<sup>1,2)</sup>  
吴满路<sup>1,2)</sup> 秦向辉<sup>1,2)</sup> 廖椿庭<sup>1)</sup>

1) 中国北京 100081 中国地质科学院地质力学研究所

2) 中国北京 100081 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室

**摘要** 为探讨汶川  $M_s8.0$  地震对龙门山断裂带现今地应力环境的影响, 2009年10—12月, 在龙门山断裂带的北川、江油地区开展了3个200 m深度钻孔水压致裂地应力测量, 获得了汶川  $M_s8.0$  地震发生1年多以后断裂带附近地壳浅表层地应力环境. 根据研究区内的原地应力测量结果及汶川  $M_s8.0$  地震引起的断层错动等资料, 运用线弹性有限元数值模拟方法, 计算得到了由断层错动位移所产生的附加应力, 并推算了ZK02和ZK03位置震前应力分布特征. 通过对比分析, 揭示了断裂带附近地应力场的变化规律, 探讨了汶川  $M_s8.0$  地震对龙门山断裂带附近地应力环境的影响.

**关键词** 龙门山断裂带 水压致裂地应力测量 地应力环境 线弹性有限元数值模拟

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.02.001 中图分类号: P315.72<sup>+</sup>7 文献标志码: A

## A preliminary study of the influence of Wenchuan $M_s8.0$ earthquake on in-situ stress state near Longmenshan fault zone: A case study in Beichuan and Jiangyou areas

Feng Chengjun<sup>1),\*</sup> Chen Qunce<sup>1,2)</sup> Tan Chengxuan<sup>1,2)</sup>  
Wu Manlu<sup>1,2)</sup> Qin Xianghui<sup>1,2)</sup> Liao Chunting<sup>1)</sup>

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

2) Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China

**Abstract:** In order to investigate the influence of Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake on in-situ stress state near the Longmenshan fault zone, hydraulic fracturing

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

<sup>\*</sup> 基金项目 国土资源部深部探测技术与实验研究专项(Sinoprobe-06-03)和中国地质调查局项目“青藏高原东缘主要断裂带地应力监测”(1212010911034)联合资助.

收稿日期 2011-12-23 收到初稿, 2012-07-04 决定采用修改稿.

<sup>+</sup> 通讯作者 e-mail: feng2010618@yahoo.cn

measurements in three 200 m-deep boreholes were carried out in Beichuan and Jiangyou areas near the fault zone from Oct. to Dec., 2009, and the distribution of current in-situ stress there at the time more than 1 year after the earthquake was analyzed. Based on the in-situ stress measurements and coseismic fault displacement in the study areas, the distribution of additional stress induced by fault motion was calculated with a linear-elastic finite element simulation, and then distribution of the principal stress at the two boreholes before the earthquake was calculated. Finally, the influence of Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake on in-situ stress state in a superficial zone near Longmenshan fault was discussed through comparative analysis.

**Key words:** Longmenshan fault zone; hydraulic fracturing stress measurement; in-situ stress state; three-dimensional linear finite element simulation

## 引言

地应力是导致地震发生的重要因素之一,大地震的孕育和发生是在特定构造部位地应力长期积累、集中、加强,最终导致应变能突然释放的过程(李四光,1977).大震发生后,断裂带附近及外围地区应力分布发生明显变化的现象已被我国研究人员所证实. Liao 等(2003)捕捉到昆仑山  $M_s8.1$  特大地震前后地表浅部(深度  $h < 60$  m)地应力变化,测量得到大地震前最大主应力为 12 MPa,地震后下降到 3—4 MPa,证实了大震前应力高度集中和大震后应力大幅降低的现象. 郭啟良等(2009)在汶川  $M_s8.0$  地震发生前 1 个月在龙门山断裂带广元—青川附近,测量得到 350—420 m 深度范围内的最大主应力为 21—22 MPa;大震后 1 个星期,重复测量得到相同深度范围内的最大主应力约为 15 MPa,同样为该现象提供了佐证.

大震发生前后,断裂带附近及外围地区最大(水平)主应力方向发生不同程度变化和调整的现象也已得到证实. 1966 年邢台  $M_s6.8$  地震和 1976 年唐山  $M_s7.8$  地震后,李方全和王连捷(1979)、李方全等(1982)、李方全和刘光勋(1986)在震中区及外围地区测得最大水平主应力方向分别为  $N54^\circ W$  和  $N47^\circ W$ ,与区域构造应力场方向(近 EW 向)有较大的差别. Tanaka 和 Oka (1979)在阪神  $M_s7.2$  地震后,在震中区附近的平木和宝殿得到最大水平主应力方向与区域构造应力场相比分别逆时针偏转了  $35.8^\circ$  和  $25^\circ$ .

2008 年 5 月 12 日汶川  $M_s8.0$  地震发生在龙门山断裂带上. 此次地震沿龙门山断裂带造成 250 余千米的地表破裂,主要沿龙门山中央断裂的中、北段及前山断裂的中段呈平行展布,沿破裂带河流阻塞、山体崩塌、大量房屋倒塌、人员伤亡严重(徐锡伟等,2008;中国地震局监测预报司,2009). 如此大的地震及其造成的地表破裂势必会对龙门山断裂带附近的应力场造成不同程度的影响. 讨论大震活动对断裂附近地应力环境的影响,在一定程度上对于认识地震的孕育、发生及发展的整个动力学过程有着重要的意义.

## 1 区域地质概况

龙门山断裂带作为青藏高原东部巴颜喀拉块体与华南块体的分界线,是中国南北地震带中段的重要组成部分,是我国最重要的地震活动带之一(邓启东等,1994;张培震等,2003;马保起等,2005;易桂喜等,2006). 断裂带南起泸定、天全,经宝兴、灌县、江油、

广元进入陕西安宁强、勉县一带, 全长约 500 km, 宽约 40—50 km, 是一条大型的活动断裂。断裂带总体走向  $N40^\circ-50^\circ E$ , 倾向北西, 主要由 4 条主断裂组成(图 1), 由西北向东南方向依次为: 龙门山后山断裂(耿达—陇东断裂、茂县—汶川断裂、青川断裂)、龙门山中央断裂(盐井—五龙断裂、北川—映秀断裂、茶坝—林庵寺断裂)、龙门山前山断裂(大川—双石断裂、灌县—安县断裂、江油—广元断裂)及山前隐伏断裂带(陈国光等, 2007)。对龙门山断裂带的地貌、地质构造、GPS 观测资料和地震活动等研究表明, 整个龙门山断裂带的活动程度在其几何展布上具有明显的非均一性, 大致以北川—江油一线为界把龙门山断裂带划分为西南段和东北段。西南段晚更新世以来活动强烈, 活动方式以逆冲为主兼具右旋走滑; 东北段第四纪活动微弱, 显示出右旋走滑—逆冲的运动方式(唐荣昌等, 1995; 李勇等, 2006, 2008; 陈国光等, 2007; 杨晓平等, 2008; 中国地震局监测预报司, 2009)。此外, GPS 观测结果表明, 断裂带西南段运动速率介于 2.0—3.0 mm/a 之间, 而东北段运动速率只有 1.5 mm/a(唐文清等, 2004; 张培震, 2008)。

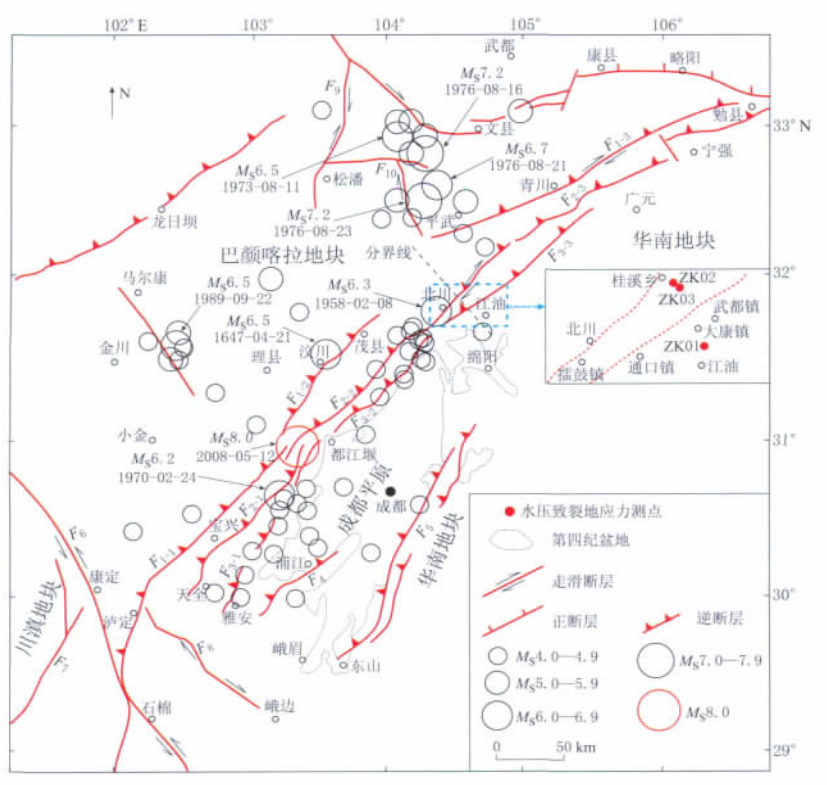


图 1 研究区地质背景与地应力测量位置示意图(据杨晓平等(2008)补充绘制)

$F_{1-1}$ : 耿达—陇东断裂;  $F_{1-2}$ : 茂县—汶川断裂;  $F_{1-3}$ : 平武—青川断裂;  $F_{2-1}$ : 盐井—五龙断裂;  $F_{2-2}$ : 北川—映秀断裂;  $F_{2-3}$ : 茶坝—林庵寺断裂;  $F_{3-1}$ : 大川—双石断裂;  $F_{3-2}$ : 灌县—安县断裂;  $F_{3-3}$ : 江油—广元断裂;  $F_4$ : 山前隐伏断裂带;  $F_5$ : 龙泉山断裂带;  $F_6$ : 鲜水河断裂带;  $F_7$ : 丽江—小金河断裂;  $F_8$ : 峨边断裂;  $F_9$ : 岷江断裂;  $F_{10}$ : 虎牙断裂

Fig. 1 Neotectonic setting and in-situ stress measurement

sites (modified after Yang *et al.*, 2008).

$F_{1-1}$ : Gengda—Longdong fault;  $F_{1-2}$ : Maoxian—Wenchuan fault;  $F_{1-3}$ : Pingwu—Qingchuan fault;  $F_{2-1}$ : Yanjing—Wulong fault;  $F_{2-2}$ : Beichuan—Yingxiu fault;  $F_{2-3}$ : Chaba—Lin'ansi fault;  $F_{3-1}$ : Dachuan—Shuangshi fault;  $F_{3-2}$ : Guanxian—Anxian fault;  $F_{3-3}$ : Jiangyou—Guangyuan fault;  $F_4$ : Potential piedmont fault zone;  $F_5$ : Longquanshan fault zone;  $F_6$ : Xianshuihe fault zone;  $F_7$ : Lijiang—Xiaojinhe fault;  $F_8$ : Ebian fault;  $F_9$ : Minjiang fault;  $F_{10}$ : Huya fault

自公元 638 年有历史地震资料记载以来, 青藏高原东缘地区共发生  $M_s \geq 4.7$  地震 66 次. 这些破坏性地震主要集中在岷山断块和龙门山断裂带西南段, 而龙门山断裂带东北段尚未有破坏性地震记载(中国地震局监测预报司, 2009). 在过去的约 350 年中, 龙门山断裂带附近发生的地震活动大致以平武—江油一线为界. 断裂带西南段在过去发生  $M_s \geq 6.0$  的地震至少有 3 次, 分别为 1657 年 4 月 21 日汶川 6.5 级、1958 年 2 月 8 日北川 6.3 级和 1970 年 2 月 24 日大邑西 6.3 级地震; 而东北段则无 6 级以上强震发生的记录(图 1)(唐荣昌, 韩渭宾, 1993; 国家地震局震害防御司, 1995).

## 2 汶川 $M_s 8.0$ 地震后龙门山断裂带附近地应力场研究

### 2.1 原地应力测量结果

水压致裂地应力测量方法是国际岩石力学学会试验方法委员会建议的确定岩体应力的有效方法之一(国际岩石力学学会试验方法委员会, 1988; Haimson, Cornet, 2003). 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震发生后, 于 2009 年 10—12 月在龙门山断裂带附近北川、江油地区 3 个钻孔中开展了水压致裂地应力测量, 测量钻孔编号分别为 ZK01、ZK02 和 ZK03, 钻孔深度均为 200 m, 钻孔位置见图 1, 各钻孔基本情况见表 1, 水压致裂地应力测量结果见表 2.

表 1 3 个测量钻孔基本情况介绍  
Table 1 Information on the 3 boreholes

钻孔 编号	北纬	东经	高程 /m	深度 /m	岩性描述	距龙门山中央 断裂距离/km
ZK01	31°49'09"	104°44'58"	583	200	主要为泥岩、砂岩、泥灰岩, 岩芯节理不发育, 较完整	10
ZK02	31°57'46"	104°39'59"	628	200	主要为泥灰岩和石灰岩, 岩芯节理不发育, 完整	2.5
ZK03	31°57'17"	104°40'20"	624	200	主要为泥灰岩和石灰岩, 岩芯节理不发育, 较完整	3.5

### 2.2 震后龙门山断裂带附近地应力状态

1) 3 个主应力值之间的关系. 在测试深度内, 3 个主应力的关系表现为  $S_H > S_h > S_v$ , 表明水平构造应力占主导作用.

2) 最大水平主应力值分布特征. ZK01 在 85.50—178.50 m 深度内, 最大水平主应力  $S_H$  为 3.86—10.66 MPa; ZK02 在 58.00—195.00 m 深度内,  $S_H$  为 2.78—7.07 MPa; ZK03 在 77.00—193.00 m 深度内,  $S_H$  为 4.14—16.19 MPa. 在距断裂最近的 ZK02 位置, 最大水平主应力值要明显低于距断裂稍远的 ZK01 和 ZK03, 呈现出随着距断层距离的增大而增加的趋势.

3) 最大剪应力值分布规律. ZK01 最大剪应力值为 0.67—2.97 MPa, 平均为 1.81 MPa; ZK02 为 0.04—1.76 MPa, 平均为 0.88 MPa; ZK03 为 0.89—5.54 MPa, 平均为 2.52 MPa. 在距离龙门山中央断裂最近的 ZK02, 最大剪应力平均值最小, 随着距断裂带距离的增大, 最大剪应力也有增加的趋势(图 2c). 这种变化趋势一定程度上与 Zoback 和 Roller (1979) 及 Zoback 等(1980)在圣安德烈斯断层附近得到的最大剪应力的变化趋势(图 2a), 以及李方全等(1982)、李方全和刘光勋(1986)在郯庐断裂带附近得到的结果较为类似(图 2b).

图 2c 显示的龙门山断裂带附近最大剪应力分布形态与图 2a, b 显示的略有不同. 作者

表 2 3 个测量钻孔水压致裂地应力测量结果  
Table 2 Results of hydraulic fracturing measurements at the 3 sites

钻孔 编号	压裂段 深度/m	压 裂 参 数				应 力 值			最大水平 主应力方向
		$P_b$ /MPa	$P_r$ /MPa	$P_s$ /MPa	$P_o$ /MPa	$S_H$ /MPa	$S_h$ /MPa	$S_v$ /MPa	
ZK01	85.50	12.31	5.51	4.20	0.86	6.23	4.20	2.27	N60°E
	94.94	15.13	4.80	3.20	0.95	3.86	3.20	2.52	
	104.50	9.24	5.02	4.06	1.05	6.11	4.06	2.77	
	123.50	13.75	6.46	4.78	1.24	6.64	4.78	3.27	
	134.50	12.46	7.32	4.88	1.35	5.98	4.88	3.56	N53°E
	152.50	12.22	5.52	5.29	1.53	8.82	5.29	4.04	
	163.47	13.35	8.75	6.19	1.63	8.19	6.19	4.33	N71°E
	178.50	16.01	9.72	7.39	1.79	10.66	7.39	4.73	
ZK02	58.00	5.32	2.47	1.82	0.53	2.78	1.82	1.54	N33°E
	80.00	7.27	4.44	2.75	0.75	3.06	2.75	2.12	
	91.85	11.07	7.03	4.18	0.87	4.64	4.18	2.43	
	117.00	9.05	5.05	3.70	1.12	4.93	3.70	3.10	
	124.00	8.75	6.34	4.58	1.19	6.21	4.58	3.29	N53°E
	133.00	10.51	6.98	4.61	1.28	6.52	4.61	3.52	
	148.00	10.75	5.75	3.86	1.43	4.40	3.86	3.92	N87°E
	185.00	13.13	10.57	6.48	1.80	7.07	6.48	4.90	
ZK03	195.00	9.03	7.60	5.35	1.90	6.55	5.35	5.17	N58°E
	77.00	7.59	6.02	4.25	0.74	6.00	4.25	2.04	
	86.00	4.58	3.38	2.78	0.83	4.14	2.78	2.28	
	95.50	7.79	4.08	3.10	0.92	4.31	3.10	2.53	
	105.50	8.67	6.50	5.54	1.02	9.09	5.54	2.80	N33°E
	123.00	9.26	7.23	5.48	1.20	8.02	5.48	3.26	
	133.00	8.78	6.47	5.41	1.30	8.45	5.41	3.52	N37°E
	144.00	9.91	7.13	5.77	1.41	8.76	5.77	3.82	
	152.20	10.76	7.09	5.11	1.49	6.74	5.11	4.03	N73°E
	166.00	11.49	10.08	7.59	1.63	11.05	7.59	4.40	

注： $P_b$  为岩石原地破裂压力； $P_r$  为破裂面重张压力； $P_s$  为破裂面瞬时关闭压力； $P_o$  为孔隙压力； $S_H$  为最大水平主应力； $S_h$  为最小水平主应力； $S_v$  为用上覆岩层（密度  $2650\text{ kg/m}^3$ ）重量估算的垂直应力。

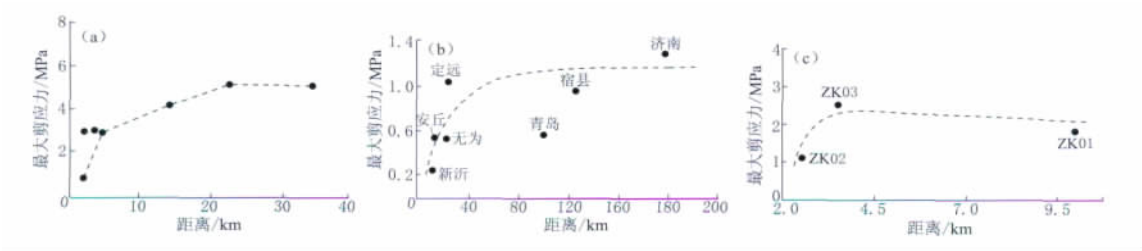


图 2 圣安德烈斯断层附近(a)、郯庐断裂带附近(b)和龙门山断裂带东北段(c)最大剪应力分布  
横坐标为测点距断层的垂直距离

Fig.2 Distribution of maximum shear stress near San Andreas fault (a), Tanlu fault (b) and the northeastern segment of Longmenshan fault zone (c)  
Abscissa indicates vertical distance from measuring sites to fault

认为是由于 ZK01 位于龙门山山前断裂的下盘, 距离山前断裂较近, 其剪应力值有所降低. 这种现象在郯庐断裂带附近的青岛和宿县两个测点中也有所体现.

4) 最大水平主应力方向. 3 个钻孔中得到的最大水平主应力方向为  $N33^{\circ}-87^{\circ}E$ , 受钻孔所在地形、岩性差异等因素的影响, 最大水平主应力方向较离散; 排除浅部结果(约 80 m 以上), 最大水平主应力方向介于  $N53^{\circ}-87^{\circ}E$  之间. 该结果与龙门山断裂带东北段右旋走滑方式为主的运动特征所反映的力学机制较相符.

### 3 汶川 $M_s8.0$ 地震对断裂带附近地应力环境影响初探

#### 3.1 研究思路

基于汶川  $M_s8.0$  地震在研究区内产生的断层错动位移资料, 运用线弹性有限元数值模拟方法, 计算得到了由断层错动位移所产生的附加应力场; 依据附加应力模拟结果, 结合 ZK02 和 ZK03 震后地应力实测结果, 运用弹性力学中的基本公式, 推算了 ZK02 和 ZK03 钻孔在同等深度上震前主应力分布特征; 最后通过对比分析, 讨论了汶川  $M_s8.0$  地震对龙门山断裂带附近地壳浅表层地应力场的影响.

1) 震前 ZK02 和 ZK03 位置初始应力状态(未知). 建立平面直角坐标系  $x'o'y'$ . 其中,  $x'$  正方向与正东方向一致,  $y'$  正方向与正北方向一致. 设在直角坐标系  $x'o'y'$  下, 地震前 ZK02 和 ZK03 在 200 m 深度内的最大、最小水平主应力分别为  $\sigma_{\max}^b, \sigma_{\min}^b$ , 最大水平方向与坐标轴  $x'$  正方向的夹角为  $\theta_0$ , 二维平面应力状态下的初始应力张量表示为

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'}^b & \tau_{x'y'}^b \\ \tau_{y'x'}^b & \sigma_{y'}^b \end{pmatrix} \quad (1)$$

2) ZK02 和 ZK03 位置附加应力状态(由数值模拟得到). 假设大震前断裂附近初始应力场连续, 大震活动产生的断层错动位移势必会对初始应力场产生影响. 由断层错动位移产生的对初始应力场的影响量或调整量我们称之为附加应力. 设该附加应力在直角坐标系  $x'o'y'$  下, ZK02 和 ZK03 在 200 m 深度内最大、最小水平主应力分别为  $\Delta\sigma_{\max}, \Delta\sigma_{\min}$ , 最大水平方向与坐标轴  $x'$  正方向的夹角为  $\theta_1$ , 二维附加应力张量表示为

$$\begin{pmatrix} \Delta\sigma_{x'} & \Delta\tau_{x'y'} \\ \Delta\tau_{y'x'} & \Delta\sigma_{y'} \end{pmatrix} \quad (2)$$

3) 震后 ZK02 和 ZK03 位置应力状态(由地应力实测结果计算得到). 在直角坐标系  $x'o'y'$  下, 设 ZK02 和 ZK03 位置在 200 m 深度内震后最大、最小水平主应力分别为  $\sigma_{\max}^a, \sigma_{\min}^a$ , 最大水平方向与坐标轴  $x'$  正方向的夹角为  $\theta_2$  (注:  $\sigma_{\max}^a, \sigma_{\min}^a$  和  $\theta_2$  为已知量, 且  $\sigma_{\max}^a = S_H, \sigma_{\min}^a = S_h$ ), 震后二维应力张量为

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'}^a & \tau_{x'y'}^a \\ \tau_{y'x'}^a & \sigma_{y'}^a \end{pmatrix} \quad (3)$$

4) 震前 ZK02 和 ZK03 位置初始应力张量求解. 根据关系式“初始应力张量(震前)+附加应力张量=新应力张量(震后)”, 可得

$$\begin{pmatrix} \sigma_{x'}^b & \tau_{x'y'}^b \\ \tau_{y'x'}^b & \sigma_{y'}^b \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta\sigma_{x'} & \Delta\tau_{x'y'} \\ \Delta\tau_{y'x'} & \Delta\sigma_{y'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{x'}^a & \tau_{x'y'}^a \\ \tau_{y'x'}^a & \sigma_{y'}^a \end{pmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可求出 ZK02 和 ZK03 位置对应深度段上震前应力张量  $\sigma_{x'}^b, \sigma_{y'}^b, \tau_{x'y'}^b$  和  $\tau_{y'x'}^b$ , 再

根据式(5)、式(6)和式(7), 则可计算出汶川  $M_s 8.0$  地震前 ZK02 和 ZK03 在同等深度上的最大、最小水平主应力及最大水平主应力方向为

$$\sigma_{\max}^b = \frac{\sigma_{x'}^b + \sigma_{y'}^b}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'}^b - \sigma_{y'}^b}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^{b^2}} \quad (5)$$

$$\sigma_{\min}^b = \frac{\sigma_{x'}^b + \sigma_{y'}^b}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_{x'}^b - \sigma_{y'}^b}{2}\right)^2 + \tau_{x'y'}^{b^2}} \quad (6)$$

$$\tan 2\theta_0 = \frac{2\tau_{x'y'}^b}{\sigma_{x'}^b - \sigma_{y'}^b} \quad (7)$$

5) 对比分析. 通过对比两钻孔的地应力推算结果(震前)与实测结果(震后), 可初步讨论汶川  $M_s 8.0$  地震对断裂附近地壳浅表层地应力环境的影响.

然而, 按照上述思路分析, 还需满足一定的假设或限定:

1) 水压致裂应力测量方法假设 3 个主应力( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ )中两个主应力为水平, 另外一个为垂直, 大小近似等于上覆岩石自重, 故本文认为大震前后垂直主应力没有发生变化, 只计算两个水平主应力及在该平面应力状态下的应力张量.

2) 文中有限元数值模拟得到的附加应力张量是三维的, 而所有的应力张量计算均为二维. 因此, 只有附加应力模拟结果中两个主应力(最大、中间主应力)均为水平或近水平时, 才能近似用三维附加应力结果中的二维应力张量参与式(4)的计算.

3) 为便于计算, 在直角坐标系  $x'o'y'$  下, 对截面上的正应力和剪应力做如下规定: 正应力均以压为正, 拉为负; 剪切应力以使微元体或单元体产生顺时针方向转动时为正, 反之为负.

### 3.2 断层错动位移引起附加应力场模拟研究

1) 三维有限元地质体模型. 以 1:50 000 DEM 图为基础, 取 ZK02 和 ZK03 所在位置周围约  $42 \text{ km}^2$  的区域作为三维地质模型的范围(模型东西长 7 km, 南北宽约 6.1 km)(图 3a). ZK02 和 ZK03 的连线近似垂直于龙门山中央断裂的走向. 由于地质条件比较复杂, 在三维地质体建模过程中进行了简化. 主要包括: ① 由于两个地应力测量钻孔位于龙门山中央断裂的下盘, 故模型中只考虑了龙门山中央断裂的下盘(图 3a); ② 将龙门山中央断裂

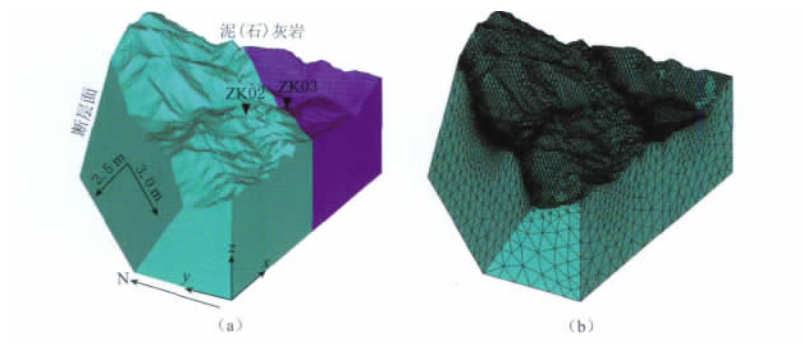


图 3 三维有限元模型(a)和有限元网格划分(b)

Fig. 3 Three-dimensional finite element model (a) and division of the finite element mesh (b)

作为一个面处理, 断裂面总体走向  $N40^\circ E$ , 倾向 NW, 倾角约  $60^\circ$ (中国地震局监测预报司, 2009); ③ 在模型中不考虑地层和岩石物性随深度的变化; ④ 模型的下表面仅取  $-1500 \text{ m}$

高程面；⑤ 参考室内岩石物理及力学性质实验结果，我们对模型中两种不同的介质参数取值如下：

ZK02 所在岩体：弹性模型  $E=18\,200$  MPa，泊松比  $\nu=0.22$ ， $\rho=2\,650$  kg/m<sup>3</sup>。

ZK03 所在岩体：弹性模型  $E=20\,000$  MPa，泊松比  $\nu=0.21$ ， $\rho=2\,700$  kg/m<sup>3</sup>。

本次三维有限元模型采用 4 面体 4 节点单元，共划分单元 229 842 个，节点个数 48 719 (图 3b)。

2) 约束条件. 对模型北侧和南侧边界  $y$  方向的位移进行约束，对模型东侧和西侧边界  $x$  方向的位移进行约束，对模型下界面即  $-1\,500$  m 高程面的  $z$  方向的位移施加约束。

3) 载荷条件. 汶川  $M_s 8.0$  地震造成的地表主破裂带显示，在 ZK02 和 ZK03 所在的北川县桂溪乡凤凰村一带，地表主破裂带错断乡村公路，水平位移至少为 3.0 m，垂直位移约为 2.5 m，断层运动性质为右旋-逆冲(徐锡伟等，2008)。在计算过程中，沿断层走向和倾向分别给断层面施加 3.0 m 的走滑分量和 2.5 m 的逆冲分量(图 3a)。

4) 附加应力分布特征(ZK02 和 ZK03 位置). ① 最大主应力分布：在 200 m 深度范围内，ZK02 处为 11.37—15.66 MPa(图 4)，方向为  $N70^\circ W$ (图 5a)；ZK03 处为 6.80—7.80 MPa

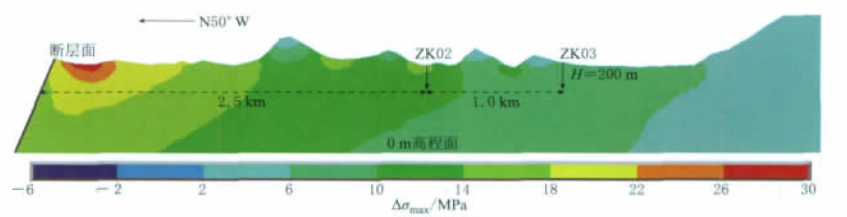


图 4 附加应力场中最大主应力分布(ZK02—ZK03 剖面)

Fig. 4 Distribution of the maximum principal stress among the additional stress near the fault (ZK02—ZK03 profile)

(图 4)，方向为  $N65^\circ W$ (图 5b)。两钻孔位置最大主应力均为拉应力，且为水平，因此，该最大主应力可近似代表二维附加应力场中的最大水平主应力  $\Delta\sigma_{\max}$ 。② 中间主应力分布：在 200 m 深度范围内，ZK02 处为 1.70—2.64 MPa；ZK03 处为 3.83—4.12 MPa (图 6)，均为拉应力(图 5)，且倾角均小于  $15^\circ$ ，近似水平，故可用该中间主应力值近似代表二维附加应力场中的最小水平主应力  $\Delta\sigma_{\min}$ 。

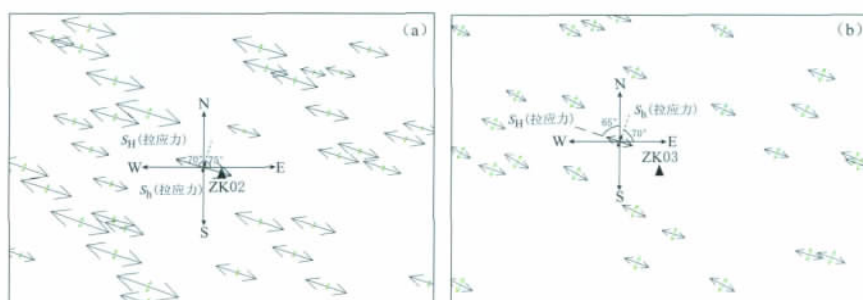


图 5 ZK02 附近(a)和 ZK03 附近(b)最大水平主应力方向

Fig. 5 Orientation of the maximum principal stress near the holes ZK02 (a) and ZK03 (b)



5) ZK02 和 ZK03 位置二维附加应力张量模拟结果. 由模拟结果可得到 ZK02 和 ZK03 中不同深度段上二维附加应力张量(表 3). 为合理对比试验数据, 我们只选取两个钻孔中已做定向印模试验深度段上的应力张量(ZK02 中共 5 段, ZK03 中共 3 段).

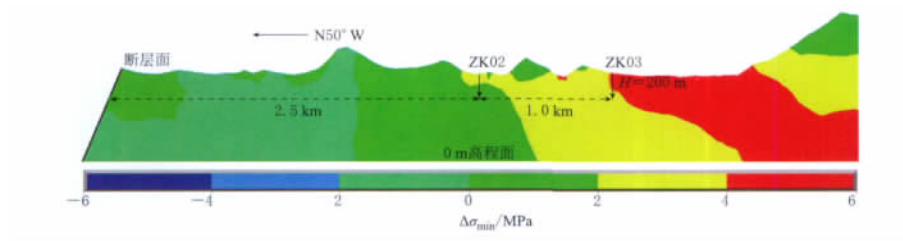


图 6 附加应力场中间主应力分布(ZK02—ZK03 剖面)

Fig. 6 Distribution of the intermediate principal stress among the additional stress near the fault (ZK02—ZK03 profile)

表 3 ZK02 和 ZK03 位置附加应力分量模拟结果

Table3 Simulated additional stress components at various depths of the holes ZK02 and ZK03

钻孔编号	计算深度/m	附加应力分量模拟值		
		$\Delta\sigma_{x'}/\text{MPa}$	$\Delta\sigma_{y'}/\text{MPa}$	$\Delta\tau_{x'y'}/\text{MPa}$
ZK02	80.00	-12.45	-3.55	3.73
	91.85	-12.27	-3.50	3.68
	117.00	-11.90	-3.38	3.57
	124.00	-11.80	-3.35	3.55
	148.00	-11.45	-3.24	3.44
ZK03	77.00	-7.14	-4.74	1.43
	95.50	-7.12	-4.70	1.44
	105.50	-7.11	-4.68	1.44

### 3.3 ZK02 和 ZK03 位置震后二维应力张量求解

已知受力物体内某点  $A$  处于平面应力状态, 已知应力分量为  $\sigma_x \neq 0, \sigma_y \neq 0, \tau_{xy} \neq 0, \sigma_z = 0, \tau_{xz} = 0, \tau_{yz} = 0$ , 根据二维平面应力张量坐标转换方程(8)、(9)、(10), 可求得任意方向  $x'$  (与坐标轴  $x$  正方向夹角为  $\theta$ ,  $\theta$  角以  $x$  轴正方向为起始线, 逆时针取正, 顺时针取负) (图 7a) 上的正应力  $\sigma_{x'}$  和切应力  $\tau_{x'y'}$  (石耀霖, 2004).

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (8)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (9)$$

$$\tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (10)$$

建立平面直角坐标系  $xoy$ . 其中,  $x$  正方向与两钻孔得到的最大水平主应力方向一致,  $y$  正方向与最小水平主应力方向一致(图 7b). 已知应力分量为  $\sigma_x^a, \sigma_y^a, \tau_{xy}^a$  和  $\tau_{yx}^a$  ( $\sigma_x^a = \sigma_{\max}^a = S_H, \sigma_y^a = \sigma_{\min}^a = S_h, \tau_{xy}^a = \tau_{yx}^a = 0$ ), 由二维平面应力张量坐标转换方程(8)、(9)、(10)可计算 ZK02 和 ZK03 在平面  $x'o'y'$  上的各深度段的应力张量值  $\sigma_{x'}^a, \sigma_{y'}^a, \tau_{x'y'}^a$  和  $\tau_{y'x'}^a$  (表 4). 由关系式  $\sigma_x^a + \sigma_y^a = \sigma_{x'}^a + \sigma_{y'}^a$  可验证表 4 中的计算结果是正确的.

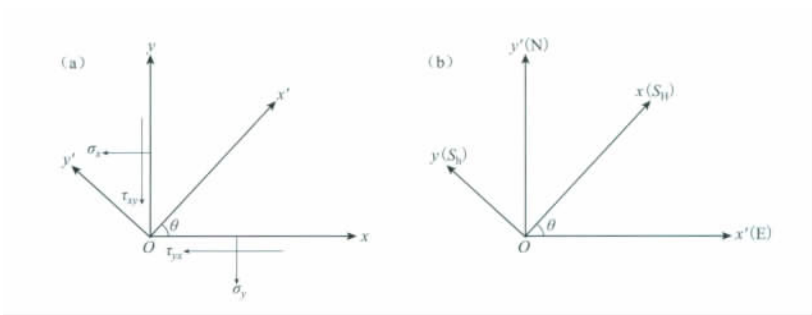


图 7 平面直角坐标系(a)及应力分量(b)

Fig. 7 Plane Cartesian coordinates (a) and stress components (b)

表 4 ZK02 和 ZK03 位置震后应力分量计算结果

Table 4 Calculated stress components at ZK02 and ZK03 (after Wenchuan  $M_S8.0$  earthquake)

钻孔 编号	计算深度 /m	水平主应力参数				水平应力分量计算值		
		$\sigma_{\max}^a/\text{MPa}$	$\sigma_{\min}^a/\text{MPa}$	$\sigma_{\max}^a$ 方向	$\theta_2/^\circ$	$\sigma_{x'}^a/\text{MPa}$	$\sigma_{y'}^a/\text{MPa}$	$\tau_{x'y'}^a/\text{MPa}$
ZK02	80.00	3.06	2.75	N33°E	-57	2.84	2.97	0.14
	91.85	4.64	4.18	N55°E	-35	4.49	4.33	0.22
	117.00	4.93	3.70	N53°E	-37	4.48	4.15	0.59
	124.00	6.21	4.58	N87°E	-3	6.21	4.58	0.09
	148.00	4.40	3.86	N58°E	-32	4.25	4.01	0.24
ZK03	77.00	6.00	4.25	N33°E	-57	4.77	5.48	0.80
	95.50	4.31	3.10	N37°E	-53	3.54	3.87	0.58
	105.50	9.09	5.54	N73°E	-17	8.79	5.84	0.99

3.4 ZK02 和 ZK03 位置初始(或震前)应力张量及主应力计算

根据式(4)–(7)可计算出 ZK02 和 ZK03 在对应深度段上的二维初始应力张量值,最大、最小水平主应力值,以及最大水平主应力方向(表 5). 由关系式  $\sigma_{x'}^b + \sigma_{y'}^b = \sigma_{\max}^b + \sigma_{\min}^b$  可验证表 5 中初始最大、最小水平主应力的计算结果是正确的.

表 5 ZK02 和 ZK03 位置初始应力分量及水平主应力计算结果

Table 5 Calculated initial horizontal stress components and horizontal principal stress at ZK02 and ZK03

钻孔 编号	深度 /m	水平主应力分量值				水平主应力参数计算值			
		$\sigma_{x'}^b/\text{MPa}$	$\sigma_{y'}^b/\text{MPa}$	$\tau_{x'y'}^b/\text{MPa}$	$\theta_0/^\circ$	$\sigma_{\max}^b$ 方向	$\sigma_{\max}^b/\text{MPa}$	$\sigma_{\min}^b/\text{MPa}$	$\sigma_v^b/\text{MPa}$
ZK02	80.00	15.29	6.52	-3.59	-19.66	N70.34°W	16.57	5.24	2.25
	91.85	16.76	7.83	-3.46	-18.90	N71.10°W	17.94	6.65	2.43
	117.00	16.39	7.53	-2.98	-16.98	N73.02°W	17.30	6.62	3.10
	124.00	18.00	7.93	-3.46	-17.25	N72.75°W	19.08	6.86	3.29
	148.00	15.69	7.25	-3.20	-18.58	N71.42°W	16.77	6.17	3.92
ZK03	77.00	11.91	10.22	-0.63	-18.40	N71.60°W	12.12	10.01	2.04
	95.50	10.66	8.57	-0.86	-19.75	N70.25°W	10.96	8.27	2.53
	105.50	15.89	10.53	-0.45	-4.78	N85.22°W	15.93	10.49	2.80

注:  $\sigma_v^b$  为垂直应力, 根据上覆岩层(密度  $2650 \text{ kg/m}^3$ )重量估算.

由表 5 可得到汶川  $M_S8.0$  地震前龙门山断裂带附近浅表层地应力分布特征:

- 1) 3 个主应力值之间的关系. 3 个主应力的关系表现为  $\sigma_{\max}^b$  (最大水平主应力)  $>$   $\sigma_{\min}^b$  (最小水平主应力)  $>$   $\sigma_v^b$  (垂直应力), 与震后相比无变化.

2) 最大水平主应力值分布规律. ZK02 最大水平主应力  $\sigma_{\max}^b$  为 16.77—19.08 MPa; ZK03 为 11.18—15.50 MPa. 距断裂最近的 ZK02 最大水平主应力值明显高于距断裂距离稍远的 ZK03, 呈现出随着距断层距离的减小而增加的趋势.

3) 最大剪应力值分布. 在 ZK02 中, 初始最大剪应力  $\tau_{\max}^b$  在 80—150 m 范围内为 6.43—7.90 MPa, 平均为 7.27 MPa; 在 ZK03 中, 约 77—106 m 范围内为 4.33—6.35 MPa, 平均为 5.23 MPa. 此结果显示出越靠近断裂, 最大剪应力值越高的趋势. 最大剪应力的这一分布态势与郭啟良等(2009)的研究结果和认识一致.

4) 最大水平主应力方向. 计算得到北川、江油地区震前的最大水平主应力方向约为  $N67^\circ-88^\circ W$ , 即 WNW—EW 向(表 5). 该结果与龙门山地区构造应力场的主压应力方向基本吻合(刘光勋等, 1986; 崔效锋, 谢富仁, 1999; 谢富仁等, 2003; 安其美等, 2004), 与汶川  $M_s8.0$  地震的震源机制解的  $P$  轴方向(WNW), 以及 4.7 级以上多数余震震源机制解  $P$  轴方位( $N60^\circ-70^\circ W$ )比较一致(胡幸平等, 2008; 郑勇等, 2009; 崔效锋等, 2011). 该方向同样有利于研究区域内该段断裂带产生的右旋走滑活动.

### 3.5 汶川 $M_s8.0$ 地震对龙门山断裂带附近浅表层地应力环境的影响

1) 对初始最大水平主应力值的影响. 受断层错动位移引起的附加应力的影响, 龙门山断裂带附近北川、江油地区的初始最大水平主应力值有所降低, 越靠近断裂带, 初始最大水平主应力的降低值也越多(图 4、图 8).

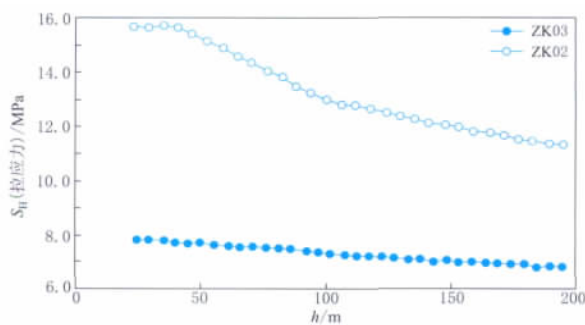


图 8 ZK02 和 ZK03 位置初始最大水平主应力( $S_H$ )降低值比较( $h < 200$  m)

Fig. 8 Contrast of decreased initial maximum principal stress between ZK02 and ZK03 ( $h < 200$  m)

比较 ZK02 与 ZK03 地震前后最大水平主应力值(表 2、表 5), 还可以明显看出, 在相同位置上, 震前断裂带附近最大水平主应力高度集中, 震后该值又大幅降低. 此外, 距断层不同位置处最大水平主应力值在地震前后的分布规律也有明显差异. 表现为: 震前, 最大水平主应力值与断裂垂直距离呈反比的趋势; 震后, 最大水平主应力值与断裂垂直距离呈正比的趋势.

2) 对最大剪应力的影响. 发震断裂附近最大剪应力值在地震前后的分布规律有明显差异. 表现为: 震前, 最大剪应力与断裂垂直距离呈反比的趋势; 震后, 最大剪应力与断裂垂直距离呈正比的趋势.

3) 对初始最大水平主应力方向的影响. 在 ZK02 和 ZK03 位置, 计算得到的震前最大水平主应力方向平均约为  $N73^\circ W$ ; 震后地应力实测得到的最大水平主应力方向介于 NNE—

ENE 之间, 优势方向为  $N53^{\circ}-65^{\circ}E$ , 平均约为  $N58^{\circ}E$ , 与震前相比逆时针偏转了约  $49^{\circ}$ 。

## 4 讨论与结论

汶川  $M_s8.0$  地震发生约 1 年后, 地应力测量结果显示断裂带附近最大水平主应力方向与区域构造应力场方向存在明显的差异, 对产生该差异的解释不同学者的观点也不尽相同。有研究表明, 汶川  $M_s8.0$  地震后, 在北川、平武以及汶川地震破裂带的最北端有相当一部分 4.7 级以下余震的  $P$  轴方向为 ENE, 认为可能是由于汶川地震主断裂上除了发生余震外, 同时引发了某些未知的 NNW 走向的次级小断裂活动(崔效锋等, 2011)。本文研究区 ZK02 和 ZK03 位置测量得到的最大水平主应力方向(NE—ENE)与该类余震的震源机制解  $P$  轴方位比较一致, 因此, 不排除研究区附近隐伏的 NNW 向次级小断裂活动对浅表层应力环境的影响。此外, 还有研究认为, 岷山隆起可能对来自西侧的中下地壳软流层物质起阻挡作用, 使其发生北东方向分流。其上部的上地壳物质也发生了同方向的运动, 从而应力方向由 NW 向 NE 转换。而远离岷山隆起带的区域, 应力方向又逐渐趋于 NW 向, 在中央断裂的北川县—南坝镇段主应力方向为 NE—ENE(刘健等, 2012)。该观点也值得进一步商榷。本文根据地震活动产生的附加应力场对初始应力场的影响, 认为造成该差异的原因主要是大震活动使得主压应力方向在震后发生偏转。

通过对比龙门山断裂带附近北川、江油地区两钻孔地震前后的地应力分布特征, 可以得出如下结论:

- 1) 在断裂带附近地壳浅表层, 3 个主应力的关系在地震前后均表现为  $S_H > S_h > S_v$  (或  $\sigma_{\max}^b > \sigma_{\min}^b > \sigma_v^b$ ), 显示出研究区域内水平构造应力作用占主导。
- 2) 在断裂带附近相同位置上, 最大水平主应力值在大震前后分别呈现出高度集中和大幅降低的现象。
- 3) 在断裂带附近不同位置上, 最大水平主应力和最大剪应力值的分布规律在地震前后均表现出明显差异: 震前, 最大水平主应力和最大剪应力值与断裂垂直距离呈反比的趋势; 震后, 最大水平主应力和最大剪应力值与断裂垂直距离呈正比的趋势。
- 4) 大震发生约 1 年后, 断裂带附近北川、江油地区地壳浅表层构造应力场的优势方向为 NE—ENE, 与震前相比, 逆时针偏转了约  $49^{\circ}$ 。

然而, 相对于汶川  $M_s8.0$  地震震源深度, 本文研究区中地应力测量钻孔的深度较浅, 用地壳浅表层的地应力测量结果分析构造应力场、解释地震等现象难免存在片面性; 在断层错动位移引起的附加应力场模拟计算中所采用的本构关系、地质模型及施加载荷条件等与实际情况难免存在差异, 且整个过程属于静态模拟, 也并没有考虑大震后大量余震活动对断裂带附近应力场的影响。此外, 已有认识表明, 大震活动对发震断裂及附近地区浅表层最大水平主应力的影响往往具有时间效应, 随着时间的逐渐推移, 主压应力方向会逐渐趋于区域构造应力场的方向。因此, 本文中分析得到的一些认识和看法也有待于以后更多全面研究资料的检验, 也需要更深入地分析, 在此也衷心地欢迎各位专家、学者批评指正。

衷心地感谢中国地质科学院地质力学研究所王连捷研究员对本文中数值模拟工作提供的帮助和指导; 感谢中国地震局地壳应力研究所安其美高级工程师、崔效锋研究员、李宏研究员对本文提出的建议。

## 参 考 文 献

- 安其美, 丁立丰, 王海忠, 赵仕广. 2004. 龙门山断裂带的性质与活动性研究[J]. 大地测量与地球动力学, 24(2): 115—119.
- 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 徐杰, 周本刚, 黎小刚, 叶友青. 2007. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 29(3): 657—673.
- 崔效锋, 胡幸平, 余春泉, 陶开, 王艳华, 宁杰远. 2011. 汶川地震序列震源机制解研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 47(6): 1063—1072.
- 崔效锋, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究[J]. 地震学报, 21(5): 513—522.
- 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. 地震地质, 16(4): 389—402.
- 郭啟良, 王成虎, 马洪生, 王崇良. 2009. 汶川  $M_s 8.0$  级大震前后的水压致裂原地应力测量[J]. 地球物理学报, 52(5): 1—7.
- 国际岩石力学学会试验方法委员会. 1988. 确定岩石应力的建议方法[J]. 岩石力学与工程学报, 7(4): 357—388.
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录[M]. 北京: 地震出版社: 474—514.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开, 崔效锋, 宁杰远, 王艳华. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解[J]. 地球物理学报, 51(6): 1711—1718.
- 李方全, 王连捷. 1979. 华北地区地应力测量[J]. 地球物理学报, 22(1): 1—8.
- 李方全, 孙世宗, 李立球. 1982. 华北及郯庐断裂带地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报, 1(1): 74—86.
- 李方全, 刘光勋. 1986. 地应力测量、地壳上部应力状态与地震[J]. 中国地震, 2(1): 50—55.
- 李四光. 1977. 论地震[M]. 北京: 地质出版社: 1—2.
- 李勇, 周荣军, 董顺利, 张毅, 何玉林, 陈浩, 闫亮, 乔宝成, 马博琳. 2008. 汶川地震的地表破裂与逆冲-走滑作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 404—413.
- 李勇, 周荣军, Densmore A L, Ellis M A. 2006. 青藏高原东缘龙门山晚新生走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 26(1): 40—41.
- 刘光勋, 李方全, 李桂荣. 1986. 我国滇西北地震活动区的活动构造与构造应力状态[J]. 地震地质, 8(1): 1—14.
- 刘健, 熊探宇, 赵越, 张永双. 2013. 龙门山活动断裂带运动学特征及其构造意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版. (待刊).
- 马保起, 苏刚, 侯治华, 舒赛兵. 2005. 利用岷江阶地的变形估算龙门山断裂带中段晚第四纪滑动速率[J]. 地震地质, 27(2): 234—242.
- 石耀霖. 2004. 地应力主应力的方位角求和与平均[J]. 地震学报, 26(1): 106—109.
- 唐荣昌, 韩渭宾. 1993. 四川活动断裂与地震[M]. 北京: 地震出版社: 123—132.
- 唐荣昌, 黄祖智, 周荣军, 朱建钢, 龚宇. 1995. 四川活断层分段与强震危险性概率预测[J]. 中国地震, 11(3): 272—282.
- 唐文清, 刘宇平, 陈智梁, 张清志, 赵济湘, Burchfiel B C, King R W. 2004. 龙门山构造带 GPS 研究[J]. 大地测量与地球动力学, 24(3): 57—60.
- 谢富仁, 崔效锋, 张景发, 窦淑芹, 赵建涛. 2003. 中国现代构造应力场基本特征及分区[M]// 中国大陆地壳应力环境研究. 北京: 地质出版社: 39—48.
- 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, 冉康永, 李细光, 李陈侠, 安艳芬. 2008. 汶川  $M_s 8.0$  地震地表破裂带及其发震构造[J]. 地震地质, 30(3): 597—629.
- 杨晓平, 冯希杰, 戈天勇, 宋方敏, 师亚芹, 刘玉法. 2008. 龙门山断裂带北段第四纪活动的地质地貌证据[J]. 地震地质, 30(3): 644—657.
- 易桂喜, 闻学泽, 王思维, 龙峰, 范军. 2006. 由地震活动参数分析龙门山-岷山断裂带的现今活动习性与强震危险性[J]. 中国地震, 22(2): 117—125.
- 张培震, 邓起东, 张国民, 马瑾, 甘卫军, 毛凤英, 王琪. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学: D 辑, 33(增刊): 12—20.

- 张培震. 2008. 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, **38**(9): 1041–1055.
- 郑勇, 马宏省, 吕坚, 倪四道, 李迎春, 韦生吉. 2009. 汶川地震强余震( $M_s \geq 5.6$ )的震源机制解及其与发震构造的关系[J]. 中国科学: D 辑, **39**(4): 413–426.
- 中国地震局监测预报司. 2009. 汶川 8.0 级地震科学研究报告[M]. 北京: 地震出版社: 15–38.
- Haimson B C, Cornet F H. 2003. ISRM suggested methods for rock stress estimation: Part 3. Hydraulic fracturing (HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures (HTPF)[J]. *Int J Rock Mech Min*, **40**: 1011–1020.
- Liao C T, Zhang C S, Wu M L, Ma Y S, Ou M Y. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the  $M_s 8.1$  Kunlun earthquake[J]. *Geophys Res Lett*, **30**(20): 2027–2030.
- Tanaka Y, Oka Y. 1979. Generation mechanism of rock bursts and water-induced earthquakes under the tectonic stress field[J]. *Rock Mechanics in Japan*, **3**(2): 183–191.
- Zoback M D, Roller J C. 1979. Magnitude of shear stress on the San Andreas fault: Implications of a stress measurement profile at shallow depth[J]. *Science*, **206**: 445–447.
- Zoback M D, Tsukara H, Hickman S. 1980. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas Fault: Implications for the magnitude of shear stress at depth[J]. *J Geophys Res*, **85**(B11): 6157–6173.

## 作者简介



丰成君 中国地质科学院地质力学研究所博士研究生。2011年中国地质科学院地质力学研究所毕业，获工学硕士学位。主要从事地应力测量与监测、构造应力场模拟与分析及区域地壳稳定性评价等工作。中国地球物理学会(学生会会员)，中国岩石力学与工程学会(学生会会员)。



李发 安徽省地震局工程师。2007年云南大学数学专业毕业，获理学硕士学位。曾从事泛函分析、代数群研究及地震分析预报工作。现主要研究方向有爆破识别、横波分裂、视应力研究及波谱分析等。



柳旭峰 北京当当网信息技术有限公司开发工程师。2012年武汉大学测绘学院固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。攻读硕士期间主要从事地震震源破裂过程研究。现从事数据开发工作，包括数据分析、数据挖掘、算法设计与实现等。



郑现 中国地震局地球物理研究所博士生。2009年吉林大学地球物理学专业毕业，获学士学位；2012年中国地震局地震预测研究所固体地球物理学专业毕业，获理学硕士学位。现在主要从事背景噪声层析成像方面的研究工作。



刘宪彬 中国地震局地球物理研究所地球探测与信息技术专业硕士研究生。2007年中国地质大学地球信息科学与技术专业毕业，获工学学士学位。现主要从事地震波在复杂介质中的传播理论和地震勘探应用研究。



张慧民 西北核技术研究所副研究。1997年北京大学地球物理系毕业，获理学学士学位；2009年西北核技术研究所信号与信息处理专业毕业，获硕士学位。一直从事禁核试地震核查技术研究、地震知识库系统研制和地震测量等方面工作。