

芦山地震前后龙门山断裂带西南段 地应力状态对比分析

邱君^{1,2)}, 吴满路^{1,2)}, 范桃园^{1,2)}, 张重远^{1,2)}, 李冉^{1,2)}, 陈利忠^{1,2,3)}

1) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081;

2) 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京, 100081;

3) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249

内容提要:2013 年 4 月 20 日芦山 $M_s 7.0$ 级地震后, 为研究龙门山断裂带西南段震后的地应力状态, 应用水压致裂法和压磁应力解除法在该区开展了 2 个钻孔的原地应力测量工作。测量结果显示硃磬测点在 128~188 m 深度范围内最小水平主应力的量值为 10.47~18.47 MPa, 最大水平主应力的量值为 19.60~25.83 MPa, 方向为 $N63^\circ\sim 85^\circ W$; 天全测点在 114~142 m 深度范围内最小水平主应力的量值为 5.20~7.73 MPa, 最大水平主应力的量值为 8.21~9.31 MPa, 方向为 $N59^\circ W$ 。两个测点水平主应力与垂直应力的关系均为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, 其中硃磬测点最大、最小水平主应力与垂直应力比值的平均值分别为 5.27 和 3.01, 天全测点最大、最小水平主应力与垂直应力比值的平均值分别为 2.60 和 1.76, 表明有利于逆断层活动。通过比较该地区芦山地震前后实测地应力状态, 发现芦山地震后, 龙门山断裂带西南段的北段(即邛崃大邑西—宝兴北—汶川南一带)和南段(即天全—荣经—泸定—康定一带)应力积累量增加。相同深度范围内, 北段硃磬测点震后的应力大小要比地震前有明显的提高, 这也与硃磬测点地应力监测结果一致。实测应力方向与震前基本一致, 都为 NW-NWW。基于实测地应力资料, 根据库伦破裂准则和 Byerlee 定律分析, 位于北段的硃磬测点震前部分压裂段的最大水平主应力处于使断层滑动临界值的上下限之间, 而地震后最大水平主应力则均已超过断层滑动临界值的上限。位于南段的飞仙关测点震前最大水平主应力均未达到断层滑动临界值的下限, 而地震后天全测点的最大水平主应力则均处于使断层滑动临界值的上下限之间。采用最大剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 与平均应力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的比值 μ_m (断层摩擦)参数评估研究区地应力的积累水平和地震危险性。震前硃磬测点 μ_m 的量值为 0.16~0.72, 平均为 0.50, 震后为 0.71~0.81, 平均为 0.77。震前飞仙关测点 μ_m 的量值为 0.31~0.35, 平均值为 0.32, 震后天全测点 μ_m 的量值为 0.53~0.57, 平均值为 0.55, 两个研究区的 μ_m 的量值均变大。分析认为芦山地震后龙门山断裂带西南段的北段和南段的应力积累量增加, 都有发生断层滑动的可能性, 尤其是北段。

关键词: 芦山地震; 龙门山断裂带西南段; 地应力测量; 地应力变化; 断层滑动

构造地震的发生, 主要在于地质构造运动, 是这种运动在岩层中所引起的地应力与岩层抵抗力之间的矛盾, 地震就是这一矛盾激化引起的结果(Li Siguang, 1977)。地震发生后, 地壳应力状态将会继续调整, 直到应力状态达到新的平衡(Chen Qunce et al., 2010)。大地震发生前后, 地应力状态会发生显著变化的现象也已被证实(Liao Chunting et al., 2003)。因此开展震后地应力测量是研究震源区的地应力调整的一个重要方面。

汶川地震之后, 许多学者在龙门山断裂带进行了大量的地应力测量, 获得了汶川地震后该地区的地应力状态, 并对该地区的地应力场分布特征与断层滑动的关系等做了大量的分析与研究, 取得了一系列重要的研究成果(Guo Qiliang et al., 2009; Wu Manlu et al., 2010; Chen Qunce et al., 2012; Liu Chang et al., 2012; Qin Xianghui et al., 2013; Sun Dongsheng et al., 2014; Feng Chengjun et al., 2015; Meng Wen et al., 2015; Cui Junwen et

注: 本文为中国地质调查局项目(编号 12120114002101)资助的成果。

收稿日期: 2016-03-14; 改回日期: 2016-04-13; 责任编辑: 周健。

作者简介: 邱君, 男, 1990 年生。硕士研究生, 主要从事地应力测量与监测、构造应力场方面的研究。Email: zcqiujun@126.com。通讯作者: 吴满路, 男, 1968 年生。研究员, 主要从事地应力测量、地应力与岩体变形长期监测、地应力测量与监测系统改制以及构造应力场等方面研究工作。Email: wumanlu@126.com。

al., 2016)。Wu Manlu et al. (2010)根据汶川震后映秀、宝兴及康定等地区的应力测量结果,认为龙门山断裂带西南段应力水平仍然较高,有潜在地震的可能。2013 年 4 月 20 日,在距离汶川地震震中西南约 90 km 的地方,发生了 $M_s7.0$ 级的芦山地震。该地震表现为逆冲错动类型,地震破裂时间不到 30 s,破裂过程反演没有表现出明显的破裂方向性且未发现地表破裂(Du Fang et al., 2013)。地震余震区长轴呈东北至西南展布,长约 40 km。因此可以认为,芦山地震并没有使汶川地震留下的 120 km 长且未破裂的龙门山断裂带西南段完全破裂,而是仅完成了龙门山断裂带西南段中段(图 1 中的 C

段,即芦山—宝兴一带)的破裂;汶川地震破裂区的南端与芦山地震破裂区的北端之间仍有 30 km 的“北段”(图 1 中的 N 段,即邛崃大邑西—宝兴北—汶川南一带)没有破裂;芦山地震破裂区的南端至龙门山断裂带的最南端,仍有 70 km 的“南段”(图 1 中的 S 段,即天全—荥经—泸定—康定一带)没有破裂(Chen Yuntai et al., 2013)。芦山地震发生后,关于龙门山断裂带西南段会不会再次发生大地震的讨论成为人们关注的焦点。在此之前龙门山断裂带南段发生过三次六级以上的地震,分别为 1327 年 9 月的天全 $M6.0$ 地震(Min Ziqun, 1995)、1941 年 6 月 12 日的泸定—天全一带的 $M6.0$ 地震(Xie

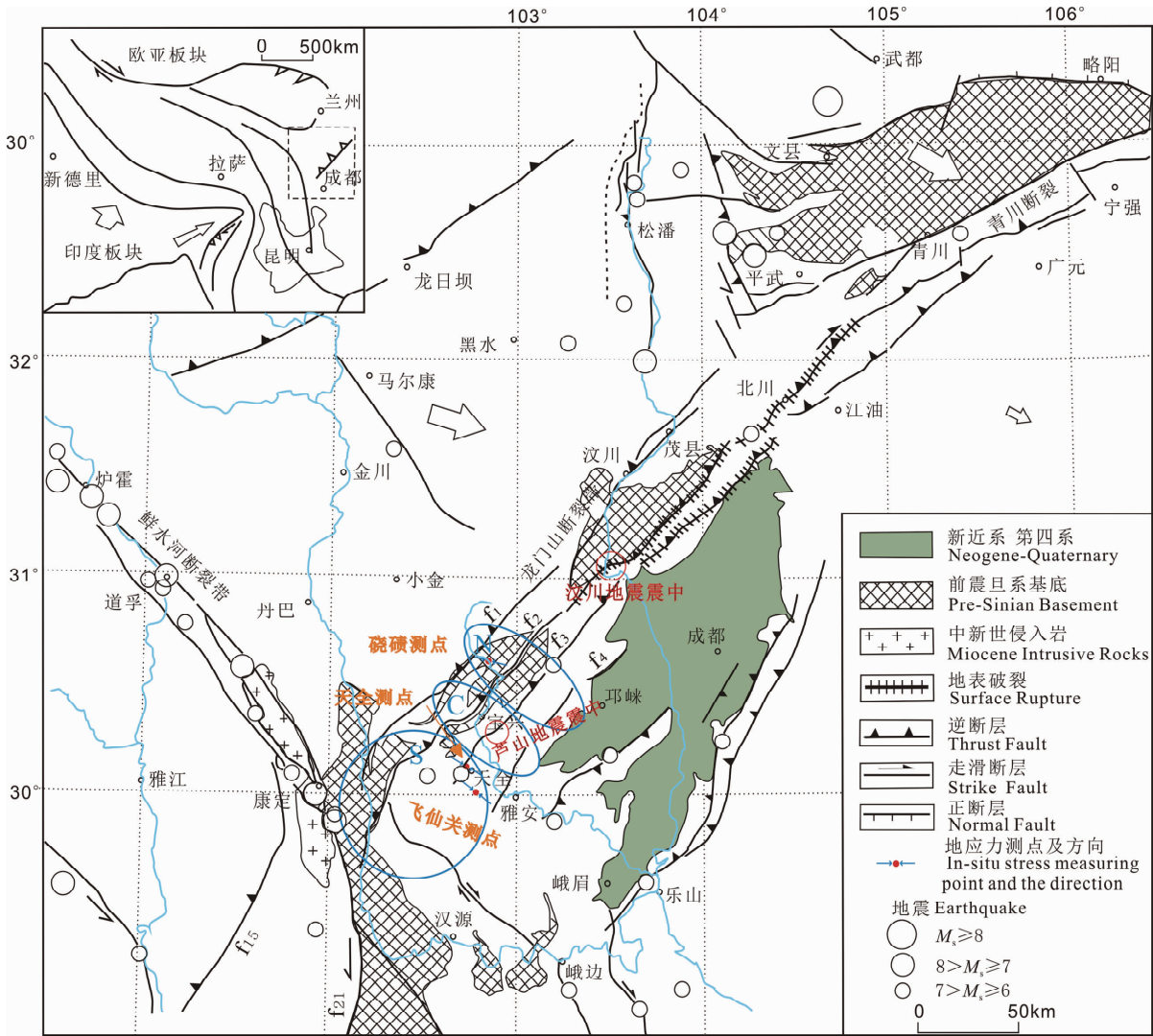


图 1 龙门山断裂带及邻区地质构造与测点位置图(据 Zhang Yongshuang et al., 2014,修改)

Fig.1 Geological structure map and the location of test boreholes in Longmenshan fault zone and its vicinity (after Zhang Yongshuang et al., 2014, revised)

f_1 —耿达-陇东断裂; f_2 —盐井-五龙断裂; f_3 —大川-双石断裂; f_4 —大邑断裂

f_1 —Gengda-Longdong fault; f_2 —Yanjing-Wulong fault; f_3 —Dachuan-Shuangshi fault; f_4 —Dayi fault

Yushou et al. , 1983)和 1970 年 2 月 24 日的大邑 $M_s 6.2$ 地震。Chen Yuntai et al. (2013)认为从地震波所释放的能量上来讲,上述这些地震不足以释放完该地区聚集的总能量。本文从地应力的角度分析该地区的断层稳定性,分别在龙门山断裂带西南段的北段和南段,利用水压致裂法和压磁应力解除法开展了震后地应力测量,并将测量结果与该地区地震前的应力状态对比。基于实测地应力资料,结合库伦破裂准则和 Byerlee 定律以及断层摩擦参数 μ_m ,综合分析评价了该地区的地震危险性。

1 区域地质背景

龙门山断裂带位于青藏高原东缘,是巴颜克拉块体与华南板块的分界线,也是由印度板块与欧亚板块碰撞引起的地壳物质东流和坚硬华南板块的阻挡而形成的大型造山带 (Royden et al. , 2008; Zhang Peizhen et al. , 2009)。龙门山断裂带长约 500 km,宽 30~40 km,北起勉县广元一带,南至泸定、天全一带,总体走向为 NE-SW (Chen Guoguang et al. , 2007),主要由后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂四条主断裂组成。按照物性分布特征、应力状态和第四纪活动特征的不同,龙门山断裂带大致可以分为东北段和西南段两段 (Dirks et al. , 1994; Chen Shefa et al. , 1995; Chen Guoguang et al. , 2007; Lou Hai et al. , 2010; Chen Qunce et al. , 2012; Meng Wen et al. , 2013)。本次芦山地震就发生在龙门山断裂的西南段。龙门山断裂带西南段的后山断裂也称耿达-陇东断裂,北起耿达,南至卧龙一带;西南段的中央断裂也称盐井-五龙断裂,北起映秀南侧的三江附近,南至泸定以东;西南段的前山断裂也称大川-双石断裂,北起大邑双河 NE 侧,南至天全 SW 一带;西南段的山前隐伏断裂也称广义的大邑断裂,北起大邑,南至荣经一带 (图 1) (Chen Lichun et al. , 2013; Zhang Yongshuang et al. , 2014)。

2 地应力测量

2.1 测点概况

(1) 硃磬测点 (QQ-1): 硃磬测点分布在距宝兴县城约 30 km 的宝兴华能硃磬电厂院内,位于盐井-五龙断裂上盘。钻孔深度为 200.14 m。岩性为闪长岩,钻孔浅部岩芯比较破碎,深部岩芯比较完整。

(2) 天全测点 (TQ): 天全钻孔分布在天全县城西约 3 km 的沙坪村,紧邻 318 国道,位于大川-双石断裂下盘,且紧邻大川-双石断裂。钻孔的深度为

150.20 m。岩性为岩屑砂岩、泥质粉砂岩和粉砂质泥岩,钻孔浅部 (0~80 m) 岩芯比较破碎,深部 (100~150 m) 岩芯比较完整。

2.2 测量原理和数据处理

本文所采用的数据是水压致裂法和压磁应力解除法地应力测量的结果,其中压磁应力解除法地应力测量仅在震后硃磬测点地下 174 m 处进行,其余数据均由水压致裂法获得。

水压致裂法是国际岩石力学学会推荐的测量地应力的两种方法之一 (Haimson, 2003),其测量理论建立在弹性力学平面应变理论基础之上。该方法具有操作简单,不需要知道岩石的力学参数等优点,是目前进行深部地应力测量最主要的方法。简单来说,水压致裂法就是利用一对可膨胀的封隔器在选定的测量深度封隔一段钻孔,然后通过泵入流体对该试验段 (常称压裂段) 增压,对该段岩石进行压裂,同时收集压力随时间的变化曲线 (图 2)。对压力随时间变化曲线进行分析计算,求得瞬时闭合压力 P_s 和重张压力 P_r ,从而计算压裂处的最小水平主应力和最大水平主应力。Bredehoeft et al. (1976)、Haimson (1980) 提出计算水平主应力的简化公式:

$$\sigma_h = P_s \quad (1)$$

$$\sigma_H = 3 P_s - P_r - P_p \quad (2)$$

式中, σ_h 为最小水平主应力, σ_H 为最大水平主应力, P_s 为瞬时闭合压力, P_r 为破裂面重张压力, P_p 为孔隙压力。

由公式 (1)、(2) 可以看出水压致裂法数据处理过程中瞬时闭合压力 P_s 的选取至关重要,它不仅直接代表最小水平主应力,而且对最大主应力值也会造成很大的影响。本文在确定瞬时闭合压力 P_s 时,利用的是国际岩石力学学会推荐的 dt/dP 法、马斯卡特 (Muskat) 法和 dP/dt 法。对于每一个具有理想压力-时间曲线的循环回次都会使用上述三种方法计算瞬时闭合压力 P_s ,且根据每种方法的计算曲

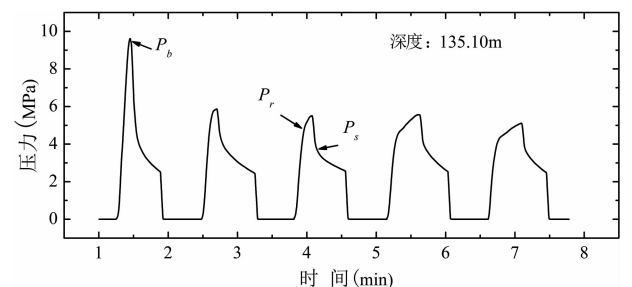


图 2 水压致裂测试曲线图

Fig. 2 The curves of hydraulic fracturing test

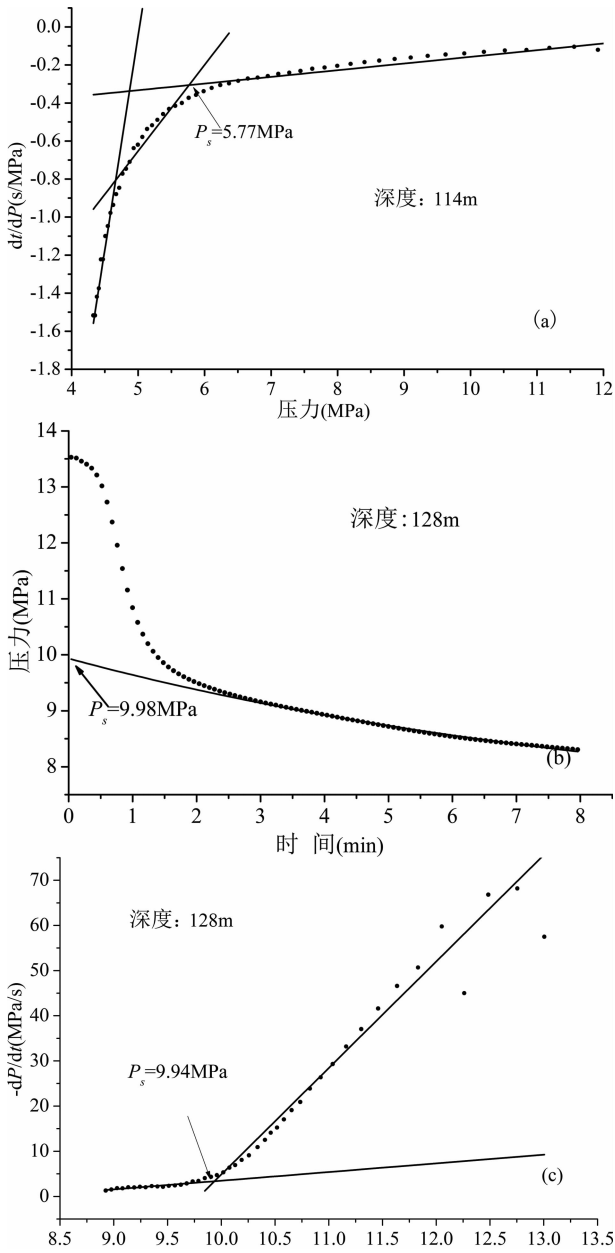


图 3 dt/dP 法(a)、Muskat 法(b)和 dP/dt 法(c)判读瞬时闭合压力示意图

Fig. 3 Sketch of using dt/dP (a)、Muskat (b) and dP/dt (c) methods to determine the instantaneous shut-in press

线(图 3)判断此种方法所取得的瞬时闭合压力 P_s 准确性,然后选取其中准确性较好的瞬时闭合压力 P_s 计算其平均值,把求得的平均值作为该压裂段最终的瞬时闭合压力 P_s 。按照上述方法,我们对震后硃磬测点和天全测点的数据进行处理,求取了瞬时闭合压力 P_s ,结果见表 1。

重张压力 P_r 是使已有裂缝重新张开时的压力。通常把加压时压力-时间曲线的斜率发生明显变化时对应点的压力值当做重张压力 P_r 。为克服岩石

在第一、二回次可能未充分破裂所带来的影响,本文在选取 P_r 时一般根据压力-时间曲线的形态,选取 3~5 循环回次中具有较为理想形态压力-时间曲线的数据求取重张压力 P_r ,并计算其平均值。按照上述方法,我们对震后硃磬测点和天全测点的数据进行处理,求取了重张压力 P_r ,结果见表 2。

瞬时闭合压力 P_s 和重张压力 P_r 是计算最大水平主应力和最小水平主应力最重要的重要参数。本文就是利用上面求取的瞬时闭合压力 P_s 、重张压力 P_r 和孔隙压力,根据公式(1)和公式(2)计算最大水平主应力和最小水平主应力。求得的硃磬测点(QQ-1)和天全测点(TQ)震后应力状态见表 3。芦山地震前在距离震后硃磬测点(QQ-1)大约 40 m 处也进行过水压致裂法地应力测量,并成功获取了该点芦山地震前的地应力状态(表 3),震前硃磬测点编号为 QQ(Wu Manlu et al., 2013)。2012 年在距离天全测点约 15 km 的雅康公路飞仙关隧道测点(FXG)曾进行过水压致裂法地应力测量,并获得了该处芦山地震前的地应力状态(表 3)(Wang Chenghu et al., 2014)。

2.3 地应力测量结果

表 3 数据结果显示,芦山地震前硃磬测点(QQ)在 80~215 m 深度范围内最小水平主应力的量值范围在 4.15~14.78 MPa 之间,最大水平主应力的量值范围在 5.25~23.73 MPa 之间。芦山地震之后硃磬测点(QQ-1)在 128~188 m 深度范围内最小水平主应力的量值范围在 10.47~18.47 MPa 之间,最大水平主应力的量值范围在 19.60~25.83 MPa 之间。从中可以看出,同一地点,大致相同的深度范围内,芦山地震后该地区的地应力有所增大,这与硃磬测点的地应力监测结果一致(Zhang Chongyuan et al., 2014)。

芦山地震前飞仙关测点在 250~372 m 深度范围内最小水平主应力的量值范围在 6.46~10.15 MPa 之间,最大水平主应力的量值范围在 12.12~19.70 MPa 之间。芦山地震之后,距离飞仙关隧道约 15 km 远的天全测点地应力测量结果表明,在 114~142 m 深度范围内最小水平主应力的量值范围在 5.20~7.73 MPa 之间,最大水平主应力的量值范围在 8.21~9.31 MPa 之间。

从表 3 中可以看出,硃磬测点的最大水平主应力的方向由地震前 N49°-60°W 变为震后的 N63°-85°W。而芦山地震前飞仙关测点和芦山地震后天全测点的最大主应力方向基本一致。从总体上看,

表 1 芦山地震后硃磬测点和天全测点瞬时闭合压力 P_s 的计算结果

Table 1 Calculation results of shut-in pressures at Qiaoqi site and Tianquan site after the Lushan earthquake

孔号	深度 (m)	第三循环回次			第四循环回次			第五循环回次			P_s 平均值 (MPa)
		dt/dP	Muskat	dP/dt	dt/dP	Muskat	dP/dt	dt/dP	Muskat	dP/dt	
QQ-1	128	10.35	9.98	9.94	10.82	9.82	9.59	9.77	9.35	9.40	9.89
	136	9.38	9.20	8.87	9.30	9.10	8.83	9.27	9.04	8.85	9.09
	159	10.00	10.89	9.92	9.88	10.49	/	10.39	9.94	9.39	10.11
	182	16.62	15.21	17.80	16.04	16.18	17.82	15.56	16.54	17.94	16.63
	188	10.91	9.22	9.35	10.89	9.28	9.12	10.11	8.81	8.90	9.62
TQ	114.25	5.17	/	/	5.77	/	/	6.26	6.04	5.73	5.79
	121.45	5.48	/	5.44	5.49	/	5.25	5.45	/	5.21	5.39
	135.10	5.30	/	4.87	5.65	/	5.19	5.21	/	4.95	5.20
	141.80	/			7.73	/	/	/			7.73

表 2 芦山地震后硃磬测点和天全测点
重张压力 P_r 的计算结果

Table 2 Calculation results of re-opening pressures at Qiaoqi site and Tianquan site after the Lushan earthquake

孔号	深度 (m)	P_r (MPa)-单切线法			P_r 平均值 (MPa)
		第三循环回次	第四循环回次	第五循环回次	
QQ-1	128	9.19	9.10	9.05	9.11
	136	9.02	9.34	9.05	9.14
	159	10.04	10.03	10.05	10.04
	182	26.16	25.93	25.88	25.99
	188	10.24	9.87	9.33	9.81
TQ	114.25	8.16	8.09	8.05	8.10
	121.45	6.09	6.16	6.07	6.11
	135.10	5.11	5.70	5.32	5.38
	141.80	/	12.55	/	12.55

该地区地震前后最大水平主应力的方向都为 NW-NWW。芦山地震震源机制解的结果显示 P 轴水平投影方向为 NW-NWW(图 4)(Luo Yan et al., 2015),这一结果与水压致裂法地应测量结果相吻合,这也显示了该地区深浅部应力场的一致性。

3 讨论

库伦准则指出,断层面的剪应力 τ 大于或等于滑动摩擦阻力 $\mu\sigma_n$ 时,断层将会滑动。当引入有效应力这个概念时,可能产生滑动的断面上的最大和最小主应力的比值为摩擦系数 μ 的函数:

$$(S_1 - P)/(S_3 - P) = [(\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu]^2 \tag{3}$$

式中 S_1 为断面上最大主应力, S_3 为断面上最小主应力, P 为孔隙压力, μ 为摩擦系数。Byerlee 定律指出大部分岩石的摩擦系数在 0.6~1.0 之间,而且此定律同样适用于浅部地壳。本文使用的地应力数据中,除飞仙关测点 334 m 压裂段的地应力状态为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ 且 σ_h 、 σ_v 相差很小,其余测点的应力状态均为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 。因此,本文利用式(3)分析断层稳定性时, $S_1 = \sigma_H$, $S_3 = \sigma_v$, $P = P_p$, 利用不同深度的

表 3 龙门山断裂带西南段地应力测量结果

Table 3 Results of stress measurement in southwestern segment of Longmenshan fault zone

孔号	深度 (m)	σ_H	σ_h	σ_v	μ_m	方位 (°)	备注
QQ-1	128	21.93	11.18	3.43	0.81	N85°W	2014 年
	136	19.60	10.47	3.67	0.77	N63°W	
	159	21.97	11.71	4.29	0.76	N85°E	
	174	25.30	14.90	4.70	0.77		
	182	25.83	18.47	4.91	0.77	N73°W	
	188	21.02	11.51	5.08	0.71		
QQ	80.50	5.25	4.15	2.13	0.53	N49°W N60°W	2010 年 (Wu Manlu et al. , 2013)
	117.50	6.66	5.22	3.11	0.47		
	135.00	5.25	4.73	3.58	0.27		
	167.00	5.47	5.09	4.43	0.16		
	174.50	13.06	9.51	4.62	0.59		
	192.07	15.27	12.09	5.09	0.61		
	201.27	18.63	13.13	5.33	0.66		
	214.37	23.73	14.78	5.68	0.72		
TQ	114.25	8.21	5.79	3.03	0.57	N59°W	2015 年
	121.45	8.93	5.39	3.29	0.57		
	135.10	8.95	5.20	3.58	0.54		
	141.80	9.31	7.73	3.76	0.53		
FXG	250.56	12.12	6.46	6.39	0.31	N46°W	2012 (Wang Chenghu et al. ,2014)
	334.29	15.56	8.28	8.53	0.31	N50°W	
	348.24	16.89	8.92	8.88	0.31		
	367.04	18.00	9.60	9.36	0.32		
	371.69	19.70	10.15	9.48	0.35	N53°W	

注: σ_H —最大水平主应力; σ_h —最小水平主应力; 主应力; σ_v —用上覆岩层(密度 2650kg/m³)重量估算的垂直应力; μ_m —最大剪应力($\sigma_1 - \sigma_3$)/2 与平均应力($\sigma_1 + \sigma_3$)/2 的比值。

σ_v 值计算 $\mu=0.6$ 和 1.0 时的 σ_H , 图 5 为四个测孔的分析结果。从图 5a 中可以看出,地震前硃磬测点地应力值就比较大,尤其是 170 m 以下的几个压裂段,最大水平主应力已经超过了断层滑动临界值的下限,其中 214 m 压裂段的最大水平主应力已经超过了断层滑动临界值的上限,说明该地区芦山地震前就有发生断层滑动的可能性。从图 5b 中可以看出,地震后硃磬测点的应力值明显增大,震后的最大

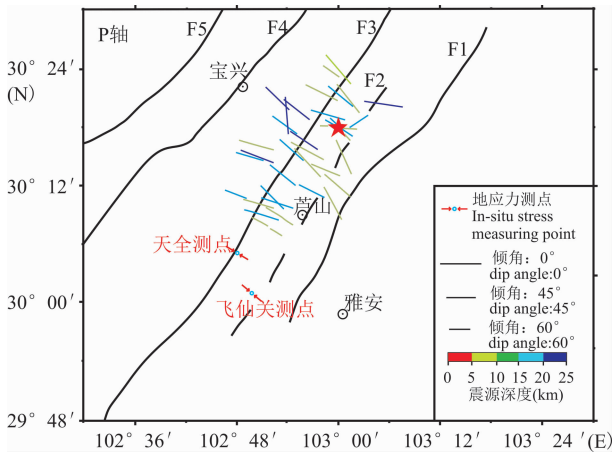


图 4 震源机制对应的 P 轴水平投影

(据 Luo Yan et al., 2015, 修改)

Fig. 4 The horizontal projection of the P axis in the focal mechanism (after Luo Yan et al., 2015, revised)

水平主应力均已超过了断层滑动临界值的上限,这说明芦山地震后龙门山断裂带西南段的北段应力积累量不仅没有释放,反而有所增加,且已经到了很容易触发断层滑动的程度,该地区发生断层滑动的可能性很大。从图 5c 中可以看出,芦山地震前飞仙关测点的应力值相对较小,最大水平主应力远没有达到断层滑动临界值的下限,断层发生滑动的可能性很小。分析图 5d 可得,芦山地震后天全测点的应力值相对较高,最大水平主应力已经超过了断层滑动临界值的下限,说明芦山地震后龙门山断裂带西南段的南段应力积累量有所增加,芦山地震后该地区有发生断层滑动的可能性。

μ_m 是最大剪应力与平均应力的比值,考虑孔隙水压力的作用时, μ_m 的表达式为:

$$\mu_m = (S_1 - S_3) / (S_1 + S_3 - 2P) \quad (4)$$

式中 S_1 为最大主应力, S_3 为最小主应力, P 为孔隙压力。本文计算 μ_m 时 $S_1 = \sigma_H$, $S_3 = \sigma_v$, $P = P_p$ 。 μ_m 的物理意义与摩擦系数 μ 近似, μ_m 与 μ 的关系如下:

$$\mu_m = \mu / (1 + \mu^2)^{1/2} \quad (5)$$

日本学者田中丰研究发现,可以用 μ_m 来判断原地应力对断层滑动的影响,且地震前后该地区的 μ_m 会变小(Tanaka et al., 1998)。 μ_m 代表应力的积累水平,它跟应力的方向无关, μ_m 越大说明应力积累水平越高,发生断层滑动的可能性越大,反之亦然。 μ_m 为 0.5~0.7 之间时,说明地壳应力处于极限状态,当 μ_m 接近 0.5 时说明应力积累水平较高, $\mu_m < 0.3$,说明应力积累水平较低(Wang Chenghu et

al., 2014)。由表 3 可知,芦山地震前硃砂测点 μ_m 的量值为 0.16~0.72,平均为 0.50,芦山地震之后硃砂测点 μ_m 的量值为 0.71~0.81,平均为 0.77。这说明芦山地震前龙门山断裂带西南段的北段应力积累已经达到了较高的水平,芦山地震之后该地区的应力积累量又有了较大的提高,地壳应力水平已经处于极限应力状态,发生断层滑动的可能性很大。芦山地震前飞仙关测点 μ_m 的量值为 0.31~0.35,平均值为 0.32,说明该点的应力积累水平较低。芦山地震后天全测点 μ_m 的量值为 0.53~0.57,平均值为 0.55。这说明芦山地震后龙门山断裂带西南段的南段应力积累量有所增加,且已经到了发生断层滑动的程度,该段有发生断层滑动的可能性。

综合对比龙门山断裂带西南段的北段和南段的应力状态可以看出,芦山地震后南北两段的应力积累量都有所增加,都达到了比较高的水平,都有发生断层滑动的可能性。但两者相比较,北段的应力积累水平要高于南段,也就是说南北两段都有发生断层滑动的可能性,但北段发生断层滑动的可能性更大。

4 结论

利用水压致裂地应力测量方法获得了芦山地震后龙门山断裂带西南段的地应力状态,并与芦山地震前该区域的地应力状态对比,研究芦山地震对龙门山断裂带西南段的北段和南段应力状态的影响,并判断这两段发生断层滑动的可能性,结论如下:

(1) 芦山地震后硃砂测点在 128~188 m 深度范围内最小水平主应力的量值为 10.47~18.47 MPa,最大水平主应力的量值为 19.60~25.83 MPa,应力值比在地震前有所增大。天全测点在 114~142 m 深度范围内最小水平主应力的量值为 5.20~7.73 MPa,最大水平主应力的量值为 8.21~9.31 MPa,该点的应力值要比震后硃砂测点的应力值小。

(2) 两个测点的水平主应力与垂直应力的关系为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$,硃砂测点最大、最小水平主应力与垂直应力比值的平均值分别为 5.27 和 3.01;天全测点最大、最小水平主应力与垂直应力比值的平均值分别为 2.60 和 1.76。显示该地区具有相对较高的水平应力,有利于逆断层的活动。

(3) 硃砂测点最大水平主应力的方向由地震前的 N49°~60°W 变为震后的 N63°~85°W。地震前飞仙关测点最大水平主应力的方向为 N46°~53°W,地

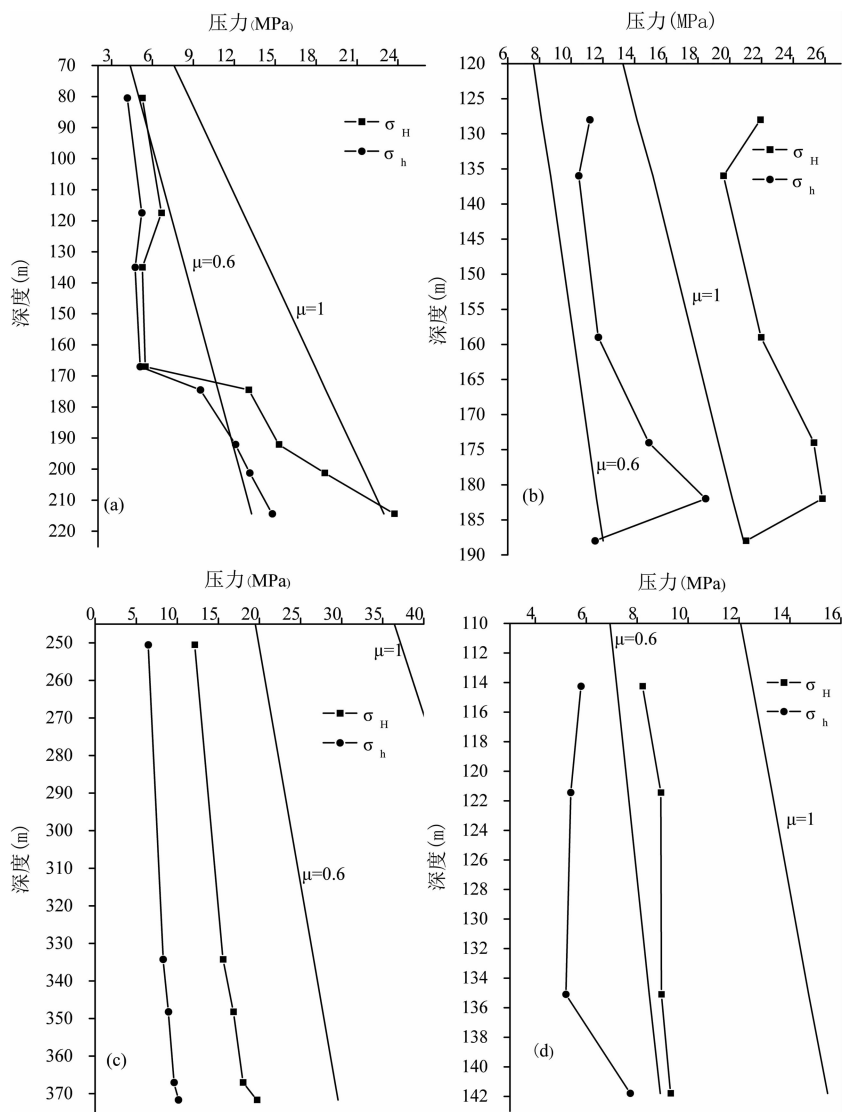


图 5 实测应力随深度变化曲线

Fig. 5 Variation of the measured stress value vs depth

(a)—硃砂测点(震前);(b)—硃砂测点(震后);(c)—飞仙关测点;(d)—天全测点; σ_H —最大水平主应力; σ_h —最小水平主应力
(a)—Qiaoqi site (before the earthquake); (b)—Qiaoqi site (after the earthquake); (c)—Feixianguan site;
(d)—Tianquan site; σ_H —maximum horizontal stress; σ_h —minimum horizontal stress

震后天全测点最大水平主应力的方向为 N59°W,方向基本没有变化。

(4)芦山地震后龙门山断裂带西南段的北段和南段应力积累水平都有提高,都有发生断层滑动的可能性,但相比较南段的应力积累水平,北段的应力积累水平更高,发生断层滑动的可能性更大。笔者认为,应当加强对上述具有潜在地震危险性区域的应力监测与研究。

致谢:野外地应力测量时,四川省地质矿产勘查开发局 109 地质队进行了钻孔工作,在地应力测量实验过程中也给予大量的帮助;赵金生副研究员和曹海波在地应力测量过程中给予大量的指导和帮

助,在此一并表示感谢。

References

Bredehoeft J D, Wolff R G, Keys W S, Shuter E. 1976. Hydraulic fracturing to determine the regional in situ stress field, Piceance Basin, Colorado. Geological Society of America Bulletin, 87 (2):250.

Chen Guoguang, Ji Fengjie, Zhou Rongjun, Xu Jie, Zhou Bengang, Li Xiaogang, Ye Youqing. 2007. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since Late Quaternary. Seismology and Geology, 29(3): 657~673 (in Chinese with English abstract).

Chen Shefa, Wilson C J L, Worley B A. 2007. Tectonic transition from the Songpan-Garzê Fold Belt to the Sichuan Basin, southwestern China. Basin Research, 7(3):235~253.

- Chen Qunce, An Qimei, Sun Dongsheng, Du Jianjun, Mao Jizhen, Feng Chengjun. 2010. Current in-situ stress state of Shanxi Basin and analysis of earthquake risk. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(4):541~548 (in Chinese with English abstract).
- Chen Qunce, Feng Chengjun, Meng Wen, Qin Xianghui, An Qimei. 2012. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(12):3923~3932 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lichun, Ran Yongkang, Wang Hu, Li Yanbao, Ma Xingquan. 2013. The Lushan M_s 7.0 earthquake and activity of the southern segment of the Longmenshan fault zone. *Chinese Science Bulletin*, 58(20):1925~1932 (in Chinese).
- Chen Yuntai, Yang Zhixian, Zhang Yong, Liu Chao. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake. *Scientia Sinica Terrae*, 43(6):1064~1072 (in Chinese).
- Cui Junwen, Wang Lianjie, Zou Zhangchun, Sun Dongsheng, Peng Chen, Chen Weiwei, Li Zongfan. 2016. The NW—SE-trending structure perpendicular to the Yingxiu-Beichuan faulting zone and the Wenchuan earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 90(6):1041~1061(in Chinese with English abstract).
- Dirks P, Wilson C J L, Chen S, Luo Z L, Liu S. 1994. Tectonic evolution of the NE margin of the Tibetan Plateau; evidence from the central Longmen Mountains, Sichuan Province, China. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 9(1): 181~192.
- Du Fang, Long Feng, Ruan Xiang, Yi Guixi, Gong Yue, Zhao Min, Zhang Zhiwei, Qiao Huizhen, Wang Zhi, Wu Jiang. 2013. The M_s 7.0 Lushan earthquake and the relationship with the $M_8.0$ Wenchuan earthquake in Sichuan, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(5): 1772~1783 (in Chinese with English abstract).
- Feng Chengjun, Zhang Peng, Qin Xianghui, Meng Wen, Tan Chengxuan, Chen Qunce. 2015. Near-surface stress measurements in the Longmenshan fault belt after the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77:358~377.
- Guo Qiliang, Wang Chenghu, Ma Hongsheng, Wang Chonggen. 2009. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake of China. *Chinese Journal Geophysics*, 52(5): 1395~1401 (in Chinese with English abstract).
- Haimson B C. 1980. Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 17(2):81~88.
- 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). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7): 1011~1020.
- Li Siguan. 1977. *The Earthquake*. Beijing: Geological Publishing House, 92~93 (in Chinese).
- Liao Chunting, Zhang Chunshan, Wu Manlu, Ma Yinsheng, Ou Mingyi. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the M_s 8.1 Kunlun earthquake. *Geophysical Research Letters*, 30(20):SDE 3~1.
- Liu Chang, Zhu Bojing, Shi Yaolin. 2012. Stress accumulation of the Longmenshan fault and recurrence interval of Wenchuan earthquake based on viscoelasticity simulation. *Acta Geologica Sinica*, 86(1):157~169(in Chinese with English abstract).
- Lou Hai, Wang Chunyong, Yao Zhixiang, Li Hongyi, Su Wei, Lü Zhiyong. 2010. Subsection feature of the deep structure and material properties of Longmenshan fault zone. *Earth Science Frontiers*, 17(5):128~141 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yan, Zhao Li, Zeng Xiangfang, Gao Yuan. 2015. Focal mechanisms of the Lushan earthquake sequence and spatial variation of the stress field. *Science China Earth Science*, 58(7):1148~1158.
- Meng Wen, Chen Qunce, Wu Manlu, Li Guoqi, Qin Xianghui, Feng Chengjun. 2013. Research on Segmentation and characteristic of tectonic stress field of Longmenshan Fault Zone. *Progress in Geophysics*, 28(3):1150~1160(in Chinese with English abstract).
- Meng Wen, Chen Qunce, Zhao Zhen, Wu Manlu, Qin Xianghui, Zhang Chongyuan. 2015. Characteristics and implications of the stress state in the Longmen Shan fault zone, eastern margin of the Tibetan Plateau. *Tectonophysics*, 656:1~19.
- Min Ziqun. 1995. *Catalog of Chinese Historical Strong Earthquakes (from 23rd century BC to 1911 AD)*. Beijing: Seismic Publishing House, 1~514 (in Chinese).
- Qin Xianghui, Chen Qunce, Tan Chengxuan, An Qimei, Wu Manlu, Feng Chengjun. 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan Fracture belt. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(A01):2870~2876 (in Chinese with English abstract).
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321(5892): 1054~1058.
- Sun Dongsheng, Lin Weiren, Cui Junwen, Wang Hongcai, Chen Qunce, Ma Yinsheng, Wang Lianjie. 2014. Three-dimensional in situ stress determination by anelastic strain recovery and its application at the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1(WFSD-1). *Science China (Earth Science)*, 57(6):1212~1220.
- Tanaka Y, Fujimori K, Otsuka S. 1998. In-situ stress measurement and prediction of great earthquake. *Earthquake*, 50(2):201~208 (in Japanese).
- Wang Chenghu, Song Chengke, Guo Qiliang, Zhang Yanshan, Ding Jianmin. 2014. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan Earthquake based on the in-situ stress measurements. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(1):102~114 (in Chinese with English abstract).
- Wu Manlu, Zhang Yueqiao, Liao Chunting, Chen Qunce, Ma Yinsheng, Wu Jinsheng, Yan Junfeng, Ou Mingyi. 2010. Preliminary results of in-situ stress measurements along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 84(9) 1292~1299 (in Chinese with English abstract).
- Wu Manlu, Zhang Yueqiao, Liao Chunting, Chen Qunce, Ma Yinsheng, Feng Chengjun, Zhang Chongyuan, Yan Junfeng, Wu Jinsheng. 2013. Research on the stress state along the Longmenshan fault belt after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake. *Progress in Geophysics*, 28(3):1122~1130 (in Chinese with English abstract).

Xie Yushou, Cai Meibiao. 1983. Annals of Historical earthquake materials in China, Vol. 1. Beijing: Science Press, 1~894 (in Chinese).

Zhang Peizheng, Wen Xueze, Xu Xiwei, Gan Weijun, Wang Min, Shen Zhengkang, Wang Qingliang, Huang Yuan, Zheng Yong, Li Xiaojun, Zhang Zhuqi, Ma Shengli, Ran Yongrang, Liu Qiyan, Ding Zhifeng, Wu Jianping. 2009. Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China. Chinese Science Bulletin, 54 (7): 944 ~ 953 (in Chinese).

Zhang Chongyuan, Wu Manlu, Chen Qunce, Liao Chunting. 2014. Piezomagnetic In-situ stress monitoring and its application in the Longmenshan fault zone. Acta Geologica Sinica (English Edition), 88(5): 1592~1602.

Zhang Yongshuang, Guo Changbao, Yao Xin, Yang Weimin. 2014. Seismic engineering geology of the east marginal region of Tibetan Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 28~29 (in Chinese).

参 考 文 献

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. 地震地质, 29(3): 657~673.

陈群策,安其美,孙东生,杜建军,毛吉震,丰成君. 2010. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析. 地球学报, 31(4): 541~548.

陈群策,丰成君,孟文,秦向辉,安其美. 2012. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析. 地球物理学报, 55(12): 3923~3932.

陈立春,冉勇康,王虎,李彦宝,马兴全. 2013. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性. 科学通报, 58(20): 1925~1932.

陈运泰,杨智娴,张勇,刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064~1072.

崔军文,王连捷,邹长春,孙东生,彭诚,陈威威,李宗凡. 2016. 映秀-北川断裂带中垂直断裂带走向的 NW-SN 向构造和汶川地震. 地质学报, 90(6): 1041~1061.

杜方,龙锋,阮祥,易桂喜,宫悦,赵敏,张致伟,乔慧珍,汪智,吴江. 2013. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系. 地球物理学报, 56(5): 1772~1783.

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. 地球物理学报, 52(5): 1395~1401.

李四光. 1977. 论地震. 北京:地质出版社, 92~93.

柳畅,朱伯靖,石耀霖. 2012. 粘弹性数值模拟龙门山断裂带应力积累及大震复发周期. 地质学报, 86(1): 157~169.

楼海,王椿镛,姚志祥,李红谊,苏伟,吕智勇. 2010. 龙门山断裂带深部构造和物性分布的分段特征. 地学前缘, 17(5): 128~141.

罗艳,赵里,曾祥方,高原. 2015. 芦山地震序列震源机制及其构造应力场空间变化. 中国科学:地球科学, 45(4): 538~550.

闵子群. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年). 北京:地震出版社, 1~514.

孟文,陈群策,吴满路,李国岐,秦向辉,丰成君. 2013. 龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究. 地球物理学进展, 28(3): 1150~1160.

秦向辉,陈群策,谭成轩,安其美,吴满路,丰成君. 2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析. 岩石力学与工程学报, 31(A01): 2870~2876.

孙东生, Lin Weiren, 崔军文, 王红才, 陈群策, 马寅生, 王连捷. 2014. 非弹性应变恢复法三维地应力测量——汶川地震科学钻孔中的应用. 中国科学: 地球科学, 44(3): 510~518.

吴满路,张岳桥,廖椿庭,陈群策,马寅生,吴金生,严君凤,区明益. 2010. 汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果. 地质学报, 84(9): 1292~1299.

吴满路,张岳桥,廖椿庭,陈群策,马寅生,丰成君,张重远,严君凤,吴金生. 2013. 汶川 M_s 8.0 地震后龙门山断裂带地应力状态研究. 地球物理学进展, 28(3): 1122~1130.

王成虎,宋成科,郭启良,张彦山,丁建民. 2014. 利用原地应力实测资料分析芦山地震震前浅部地壳应力积累. 地球物理学报, 57(1): 102~114.

谢毓寿,蔡美彪. 1983. 中国历史地震资料汇编. 第一卷. 北京: 科学出版社, 1~894.

张培震,闻学泽,徐锡伟,甘卫军,王敏,沈正康,王庆良,黄媛,郑勇,李小军,张竹琪,马胜利,冉勇让,刘启元,丁志峰,吴建平. 2009. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. 科学通报, 54(07): 944~953.

张永双,郭长宝,姚鑫,杨为民. 2014. 青藏高原东缘地震工程地质. 北京:地质出版社, 28~29.

Comparative Analysis of In-situ Stress State in the Southwestern Segment of Longmenshan Fault Zone before and after Lushan Earthquake

QIU Jun^{1, 2)}, WU Manlu^{1, 2)}, FAN Taoyuan^{1, 2)}, ZHANG Chongyuan^{1, 2)},
LI Ran^{1, 2)}, CHEN Lizhong^{1, 2, 3)}

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

2) *Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100081;*

3) *China University of Petroleum(Beijing), College of Geoscience, Beijing, 102249*

Abstract

Hydraulic fracturing and piezomagnetic overcoring in-situ stress measurements were carried out in two boreholes in the southwestern Longmenshan Fault Zone to understand the current in-situ stress state and stress change after the Lushan M_s 7.0 earthquake on the April 20th, 2013. Measurement results show that the maximum horizontal principal stress and minimum horizontal principal stress at the Qiaoqi borehole is 19.60~25.83 MPa and 10.47~18.47 MPa within the depth of 128~188 m, with an orientation of N63°~85°W; the maximum horizontal principal stress and minimum horizontal principal stress at the Tianquan borehole is 8.21~9.31 MPa and 5.20~7.73 MPa within the depth range of 114~142m, with an orientation of N59°W. Relationships between horizontal stress and vertical stress of the two measuring points are $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$. The average ratios of maximum and minimum horizontal stress to vertical stress at the Qiaoqi borehole are 5.27 and 3.01 respectively. The average ratios of maximum and minimum horizontal stress to vertical stress at the Tianquan borehole are 2.60 and 1.76 respectively. The results that horizontal stress is higher than vertical stress will lead to a reverse fault activity. Comparison of in-situ stress states in this area before and after the Lushan earthquake suggests that after the earthquake the accumulation of stress of the unbroken active faults on both sides of the epicenter has been increasing. What's more, the stress magnitude at the Qiaoqi borehole improves significantly after the earthquake, which is in consistent with the monitoring results at the Qiaoqi. On the basis of in-situ stress data and Coulomb faulting criterion, the maximum horizontal principal stress at Qiaoqi was between the minimum and the maximum of fault slip before the earthquake, and exceeded the maximum after the earthquake. The maximum horizontal principal stress at Feixianguan was lower than the maximum of fault slip before earthquake. μ_m , the ratio between the maximum horizontal principal stress $[(\sigma_1 - \sigma_3)/2]$ and average stress $[(\sigma_1 + \sigma_3)/2]$, can be used to evaluate the present stress accumulation level and the seismic risk. The pre-earthquake μ_m value at Qiaoqi was 0.16~0.72, with an average of 0.50, and the post-earthquake μ_m value at Qiaoqi is 0.71~0.81, with an average value of 0.77. The pre-earthquake μ_m value at Feixianguan was 0.31~0.35, with an average of 0.32, and the post-earthquake μ_m value at Tianquan was 0.53~0.57, with an average value of 0.55. μ_m values in two study areas show a big difference. This study concludes that the stress in the northern and southern segments of the Longshan fault zone has been accumulated, which can increase possibility of fault slipping, especially in the northern segment.

Key words: the Lushan earthquake; southwestern segment of Longmenshan fault zone; in situ stress measurement; change of in situ stress; fault slip