

汶川地震后沿龙门山断裂带原地应力测量初步结果

吴满路^{1,2)}, 张岳桥^{1,2)}, 廖椿庭^{1,2)}, 陈群策^{1,2)}, 马寅生^{1,2)}, 吴金生³⁾, 严君凤³⁾, 区明益^{1,2)}

1) 国土资源部新构造运动与地质灾害重点实验室, 北京, 100081; 2) 中国地质科学院地质力学研究所, 北京, 100081; 3) 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都, 611734

内容提要:2008年5月12日在中国四川省西部汶川发生 Ms8.0 地震,震中位于青藏东缘龙门山断裂带。地震发生后的4个月,沿龙门山断裂带中南段开展了原地应力测量,获得了3个测点的应力大小和方向。在3个测孔中浅部采用压磁应力解除法,深部采用水压致裂法。浅部测量结果显示,位于震中区映秀测点,水平最大主应力值为4.3MPa,最大主应力方向为 N19°E;宝兴测点位于震中区西南的龙门山断裂带南段,汶川地震没有导致该段地表破裂,该点获得的水平最大主应力值为9.8MPa,最大主应力方向为 N51°W;位于龙门山断裂带最西南端的康定测点,水平最大主应力值为2.6MPa,最大主应力方向为 N39°E。利用水压致裂法对各钻孔100~400m深度进行了应力测量,获得了应力随深度变化趋势和应力状态。与震前其它应力测量结果和中国其它地区表层地应力测量结果比较,龙门山断裂带西南段处于相对高应力水平,震中区仍处于中等应力水平。这项研究成果将为评价龙门山断裂带余震和今后强震发展趋势提供关键构造物理参数。

关键词: 汶川 Ms8.0 地震; 原地应力测量; 应力解除; 水压致裂; 龙门山断裂带

大地震往往发生在活动断裂带上相对高应力积累区或闭锁段落上(Aki, 1984)。如何有效地识别出断裂带上正在积累应力、孕育大地震的段落,成为大地震中-长期危险地段判定的重要依据。Wiemer等(1997,2000)及 Wyss等(2000,2002)利用震级-频度关系中 a, b 值等地震活动性参数的空间分布,来分析和判定活动断裂带现今相对应力水平的空间分布,从中区分出正处于相对高应力段落或者凹凸体段落。而原地应力测量则是一个更直接获得断裂带附近地表浅层应力的大小和方向的方法(Zoback and Healy, 1984,1992;Liao et al., 2003)。

2008年5月12日在中国四川省西部发生的 Ms8.0 大地震,导致龙门山断裂带发生具有右旋分量的逆冲运动,震源深度在14~19 km。这次地震形成了275km长的地表破裂带,该破裂带自震中区向东北方向延伸。余震主要分布在从映秀镇到青川县的龙门山断裂带的中北段,形成长达近330km的余震带。地震产生的地表破裂构造已做了详细的野外调查和测量(Dong et al., 2008; 李海兵等, 2008; 徐锡伟等 2008; 张培震等, 2008),对发震构

造和深部动力学背景也做了大量的探讨(如: Xu et al., 2008; 藤吉文等, 2008; 张培震等, 2008; 张岳桥等, 2008; 赵国泽等, 2009)。主震后三个月,地震台网记录到2万3千多次余震。其中6级以上余震8次,最大的余震是5月25日下午发生在青川的6.4级余震;5级以上余震39次,4级以上余震达280余次。7月24日,青川一带又发生了5.6、6.0和6.1级较强余震。余震的数量和强度仍有较大的起伏,目前震区仍有5级左右及5级以下的余震发生。如此多的余震都集中在龙门山断裂带的中北段,而其西南段很少,一个普遍关心的问题是龙门山西南段会发生破裂吗?今后该处发震的可能性如何?强震后龙门山断裂带余震发展趋势如何?测量和确定汶川地震震后龙门山断裂带应力状态将为开展余震和今后强震发展趋势评价提供重要物理参数。在综合分析汶川地震破裂过程、地表破裂特征、地震断层运动学特征等基础上,笔者在龙门山断裂带的西南段和震中区开展了三个点的现场地应力测量工作,用于了解该区震后地表和浅层地应力水平,并将这些测量结果与震前应力

注:本文为科技部973项目(编号2008CB425702)和国土资源部《深部探测技术与实验研究》专项(编号SinoProbe-06)资助的成果。

收稿日期:2009-04-20;改回日期:2010-02-02;责任编辑:郝梓国。

作者简介:吴满路,男,1968年生。研究员。主要从事地应力测量、岩石力学等方面的研究工作。Email: wumanlu@126.com。通讯作者:张岳桥。Email: zhangyueqiao@yahoo.com。

测量结果对比,判断龙门山断裂带今后余震和强震发展趋势。

1 应力测量方法

目前直接测量地应力大小和方向的方法主要有两种:压磁应力解除法(overcoring of the piezomagnetic stress gauge)和水压致裂法(hydraulic fracturing)。压磁应力解除法用来测量近地表的应力,测量深度通常在 50m 以内。该方法经过野外测试和实验室检验,所获得的应力值相当、可靠,主应力大小测量误差小于 10%,主应力方向误差小于 3°,这种测量技术被广泛用于隧道、矿山、水电等工程建设和地质构造分析(李方全等, 1982, 1998; 廖椿庭等, 1983, 2002; Sun et al., 1984; Shi et al., 1991; Wang et al., 1986; Xu et al., 1994; 安美其等, 2004)。

水压致裂法主要用于深部应力测量,该测量方法是 1987 年国际岩石力学学会试验方法委员会颁布的确定岩石应力建议方法中所推荐的方法之一

(CTM, 1987),也是目前能较好地直接进行深孔应力测量的先进方法(Zoback and Healy, 1992)。

2 原地应力测量结果

选择了三个地点进行应力测量,分别位于震中区的映秀测点、龙门山断裂带西南段的宝兴测点和龙门山断裂带与鲜水河断裂带交会处的康定测点(图 1)。三个应力测点的工程地质条件和应力测量结果简述如下。

(1) 映秀测点:该测点位于汶川地震震中东北映秀镇,映秀断裂上盘,离地表破裂带 500m 处的公路隧道在地震中保存较好。测点出露岩性为花岗岩。在钻井过程中,发现该点受到地震的强烈挤压破碎,岩体的完整性相对较差,取出的岩芯很破碎,在 20m 以内很难找到测量段。压磁应力解除测量在 20 余米进行($\Phi 130\text{mm}$ 口径)。此后,采用 $\Phi 76\text{mm}$ 口径继续钻进,终孔深度为 200m。由于该孔岩体总体较破碎,用水压致裂法测量的误差较大。浅部测得的最大水平主应力方向为 $N19^\circ E$,而深部

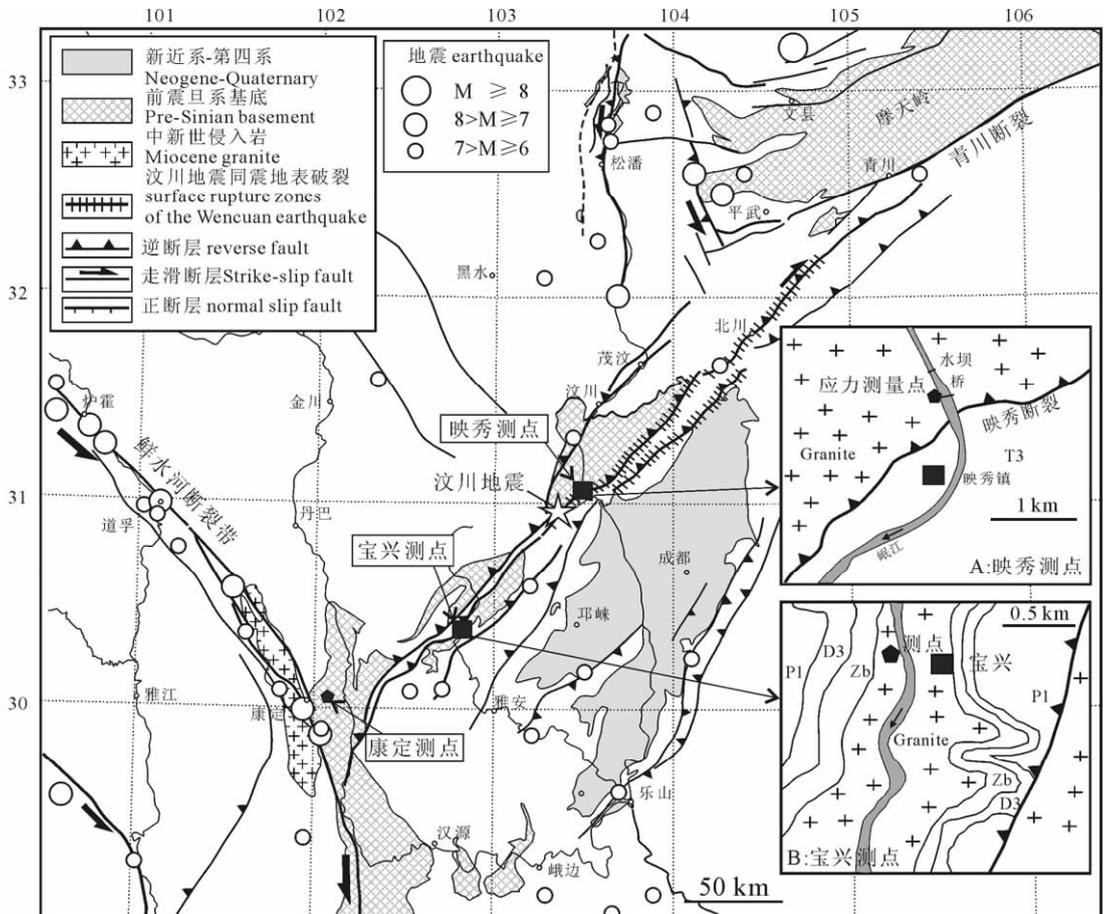


图 1 龙门山断裂带新构造背景与应力测量点分布图

Fig. 1 Neotectonic setting of the Longmenshan fault zone and location map of stress measurement sites

水压致裂法测得的最大水平主应力向为 N56°W。另外,因裂隙发育,孔中进行多次印模确定最大主应力方向,效果不十分理想,仅一次效果较好。测量结果列于表 1、表 2 中。

在该测点,地表用解除法测得的最大水平主应力值为 4.3MPa,最小水平主应力值为 2.7MPa。用水压致裂法于 170~180m 孔深处,测得的最大水平主应力值在 15~16MPa,最小水平主应力值约为 9~11MPa。该点应力状态 $S_H > S_h > S_v$,属于逆冲型。

表 1 用解除法获得的近地表应力测量结果表

Table 1 List of measured results of near-surface stresses by overcoring method

测点	地理坐标	岩性	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_H 方向
映秀	N31°3.986' E103°29.350	花岗岩	4.3	2.7	N19°E
宝兴	N31°22.297' E102°48.539	花岗岩	9.8	7.9	N51°W
康定	N30°04.432' E102°09.040	花岗岩	2.6	1.8	N39°E

注: S_h —最小水平主应力; S_H —最大水平主应力。

表 2 映秀测点水压致裂法测量结果一览表

Table 2 List of measured results of stresses using hydraulic fracturing at Yingxiu site

深度 (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	S_h (MPa)	S_H (MPa)	S_v (MPa)	T (MPa)	S_H 方向
90.00	0.82	4.30	3.50	2.60	2.60	3.48	2.39	0.80	N56°W
128.00	1.20	13.62	12.78	7.44	7.44	8.34	3.39	0.84	
142.00	1.34	9.95	8.70	5.95	5.95	7.81	3.76	1.25	
171.00	1.63	18.21	18.18	11.81	11.81	15.62	4.53	0.03	
178.00	1.70	11.30	10.98	9.68	9.68	16.36	4.72	0.32	
185.00	1.77	12.73	10.17	8.35	8.35	13.11	4.90	2.56	

注: P_0 —空隙压力; P_b —破裂压力; P_r —重张压力; P_s —关闭压力; T —水压致裂抗张强度; S_h —最小水平主应力; S_H —最大水平主应力; S_v —垂向应力。

(2) 宝兴测点:该测点位于龙门山断裂带西南段的宝兴县城,距汶川地震震中的直线距离 100 余公里。岩性为花岗岩。该孔钻至 18~22m 时,采用压磁应力解除法测量原岩应力,取得了可靠数据。然后,采用 $\Phi 76$ mm 口径继续钻进,钻至 160 余米处,出现冒水,水压较大,最高时喷出井口的水柱达 7~8m,指示地下裂缝非常发育、水压较大。钻孔终孔深度为 400m,然后采用水压致裂法测量不同深度的应力状态。

测量结果见表 1 和表 3。与映秀测点相比,该点应力值相对较大。浅部用应力解除法获得的最大水平主应力值达 9.8MPa,最小水平主应力值约 7.9 MPa,最大主应力方向约为 N51°W。而在 354m 深处,水压致裂法的测量结果为最大水平主应力值达 25MPa,最小水平主应力值约 15MPa,最大主应力方向约为 N59°W。该点应力状态 $S_H > S_h > S_v$,属于逆冲型。

另外,距测点东北方向约 60km 的碓磝镇,因电站建设,曾在钻孔 280.46m 深处开展过应力测量,获得最大主应力值达 25.53MPa,最小主应力值约 13MPa,最大主应力方向约为 N39°E(表 4)^①。这个测量结果显示,龙门山西南段的应力值明显偏高。

表 3 宝兴测点水压致裂应力测量结果一览表

Table 3 List of measured results of stresses using hydraulic fracturing at Baoxing site

深度 (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	S_h (MPa)	S_H (MPa)	S_v (MPa)	T (MPa)	S_H 方向
128.00	1.28	6.67	5.96	3.40	3.53	3.63	3.39	0.71	N23°W
156.00	1.56	6.11	5.26	3.44	3.44	3.50	4.13	0.85	
189.00	1.89	11.71	10.32	7.36	7.36	9.87	5.01	1.39	
219.00	2.19	12.12	8.33	6.45	6.45	8.83	5.80	3.79	
258.00	2.58	12.53	12.25	9.81	9.81	14.60	6.84	0.28	N80°W
283.00	2.83	16.62	15.76	12.27	12.27	18.22	7.50	0.86	
317.00	3.17	17.29	12.82	11.09	11.09	17.28	8.40	4.47	N74°W
354.00	3.54	18.56	18.04	15.75	15.75	25.67	9.38	0.52	
387.00	3.87	11.86	11.48	10.08	10.08	14.89	10.26	0.38	

注:表中符号同表 2。

表 4 碓磝水库大坝水压致裂应力测量一览表^①

Table 4 Measured results of stresses by hydraulic fracturing at Yaoji site

深度 (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	S_h (MPa)	S_H (MPa)	S_v (MPa)	T (MPa)	S_H 方向
180.25	1.08	9.04	8.34	8.28	8.28	15.42	4.77	0.7	N57°E
187.55	1.15	12.72	8.95	8.19	8.19	14.44	4.96	3.77	
224.44	1.51	14.23	12.46	11.61	11.61	20.86	5.49	1.77	N63°E
233.29	1.60	16.69	13.66	11.11	11.11	18.07	6.18	3.03	N1°W
241.15	1.68	8.50	6.39	5.68	5.68	8.97	6.38	2.11	N55°E
250.33	1.77	12.29	10.89	10.80	10.80	19.74	6.63	1.40	
259.10	1.85	13.69	11.81	11.68	11.68	21.38	6.86	1.88	
264.37	1.91	13.66	6.61	5.39	5.39	7.65	7.00	7.05	N22°E
275.07	2.01	7.67	5.32	6.41	6.41	11.90	7.28	2.35	N39°E
280.46	2.06	15.60	13.00	13.53	13.53	25.53	7.42	2.60	

注:表中符号同表 2。

(3) 康定测点:该测点位于康定县姑咱镇的瓦斯村,处于龙门山断裂带与鲜水河断裂带交汇处,岩性

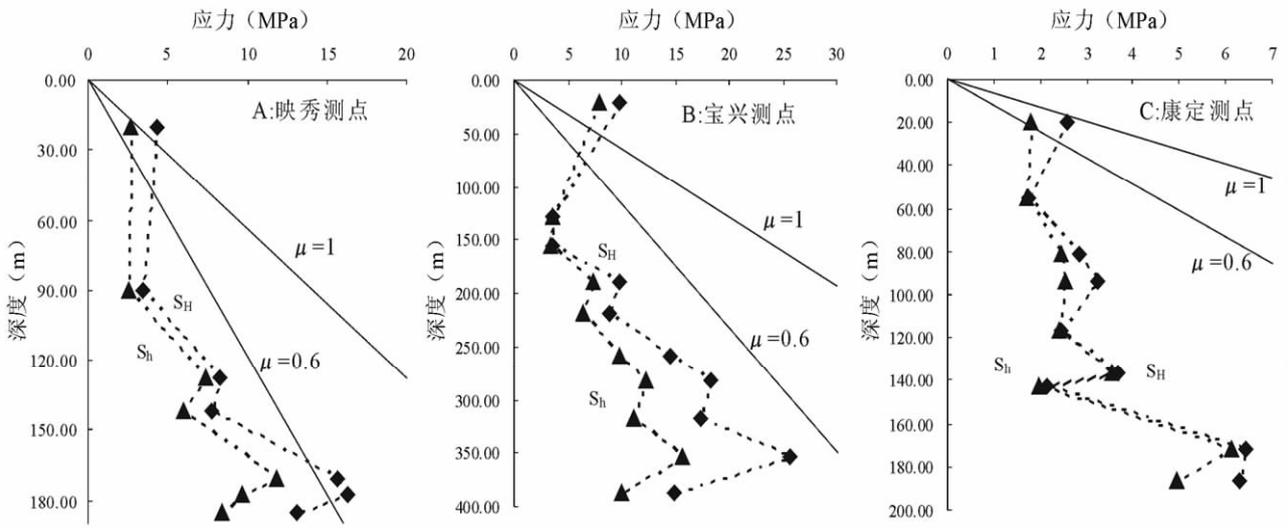


图 2 三个应力测量点应力值随深度的变化

Fig. 2 Variation of the measured stress values vs depths at three sites

为花岗岩。地表岩体相对完整,开钻 2m 后见基岩,8m 前岩石较破碎,十余米后开始采用压磁应力解除法测量原岩应力,试验段岩石相对完整,20m 后结束测量,取得了可靠数据。此后,采用 $\Phi 76\text{mm}$ 口径继续钻进,终孔深度为 200m。然后采用水压致裂法测量不同深度的应力状态。

康定测点测量结果列于表 1 和表 5。结果显示,近地表 20m 深处应力解除法获得的水平最大主应力为 2.6MPa,最小水平主应力 1.8 MPa,最大主应力方向 $N39^\circ E$ 。在 170~180m 深处用水压致裂法获得的最大水平主应力为 6.4MPa,最小水平主应力为 4.9~6.12MPa。该点应力状态 $S_H > S_h > S_v$,属于逆冲型,但应力值明显偏低。

表 5 康定测点水压致裂应力测量结果一览表

Table 5 List of measured results of stresses using hydraulic fracturing at Kangding site

深度 (m)	P_0 (MPa)	P_b (MPa)	P_r (MPa)	P_s (MPa)	S_h (MPa)	S_H (MPa)	S_v (MPa)	T (MPa)	S_H 方向
55.00	0.31	4.47	3.27	1.70	1.70	1.74	1.46	1.20	$N5^\circ E$
81.00	0.57	4.66	3.91	2.44	2.44	2.84	2.15	0.75	$N81^\circ E$
94.00	0.70	4.10	3.61	2.52	2.52	3.25	2.49	0.49	
117.00	0.93	5.03	3.93	2.31	2.42	2.46	3.10	1.10	
136.00	1.12	9.81	6.12	3.55	3.55	3.67	3.60	3.69	
143.00	1.19	2.86	2.53	1.95	1.95	2.13	3.79	0.33	
172.00	1.48	17.32	11.47	5.92	6.12	6.41	4.56	5.85	
186.00	1.62	10.91	6.89	4.94	4.94	6.31	4.93	4.02	

注:表中符号同表 2。

3 讨论

图 2 展示了 3 个测量点应力大小随深度的变化,并用库仑摩擦滑动准则对实测的地应力资料进行分析,判断断裂的活动性。从中可以看出,利用压磁套芯应力解除法获得的近地表应力值明显大于用水压致裂法测量的地表浅部($<400\text{m}$)应力值,出现了表层应力值的“突升”。这种现象可能存在两方面原因:一方面,用压磁套芯应力解除法获得应力处于用库仑摩擦滑动准则推导的岩石破裂状态。这种表层应力偏大可能是受到地形影响的结果;另一方面,由于测点处在断裂带附近,不管是震中区或外围,其岩石均遭受强烈挤压破碎,其完整性较差,浅层水压致裂法测量的结果相对偏低,误差也较大,但总的趋势是随着深度增加而增大,其中出现的不规则变化,应与不同段落岩石裂隙发育程度有关。

总体来说,康定测点的应力水平小于远离断层产生摩擦滑动的临界值,因而该点处于稳定状态。而宝兴测点和映秀测点的最大水平主压应力值接近岩石发生摩擦滑动的临界下限(摩擦系数 $\mu=0.6$)。

为了探讨龙门山断裂带地震前后应力水平变化和断裂活动性的分段特征,将震后应力测量结果与震前所做的 5 个点的测量结果进行对比(表 6)。这 5 个测点分布于龙门山断裂带的各段(图 3)(安其美等,2004)。遗憾的是,没有测点分布在汶川地震破裂带上,因而无法知道震前震中区的应力大小。但从这些浅层测量数据可以看出,龙门山断裂带北段

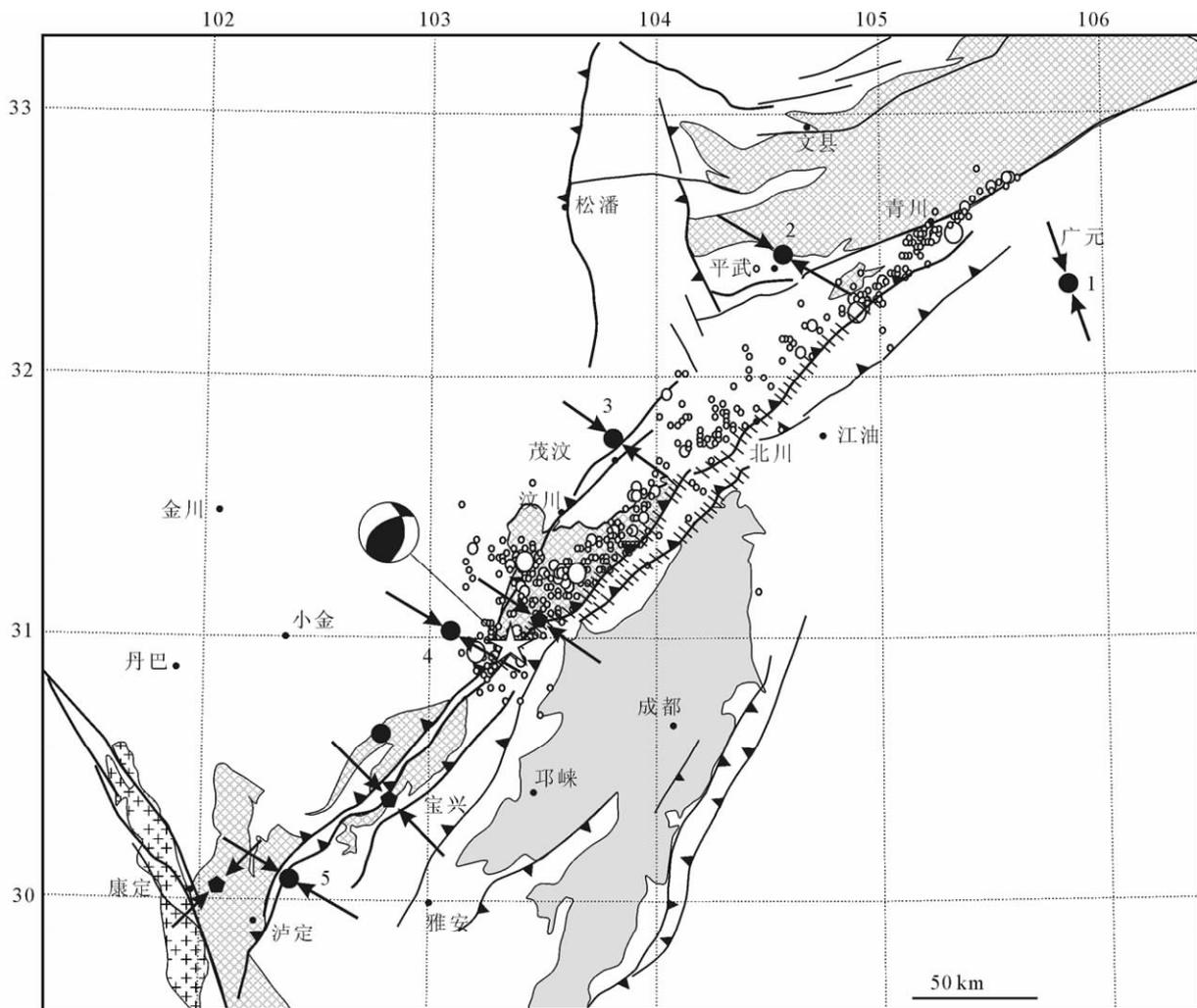


图3 龙门山断裂带最大水平主应力方向和余震分布图。箭头指示最大水平主应力方向

Fig. 3 Maximum horizontal stress and aftershock distribution along the Longmenshan fault zone.

Arrows indicate the orientation of maximum horizontal stress

两侧的应力值相对较低,处于中偏低应力水平;位于中段茂汶断裂西侧的后龙门山构造带(2个测点),处于中等应力水平,在230~240m深处,获得的最大水平应力值约14 MPa。值得注意的是龙门山西南段,其地壳应力水平相对较高。震前在硃碛电站附近(测点5)于150m深处获得的最大水平主应力达25 MPa^①。在南段二郎山附近也获得了较高的应力值(安其美等,2004),判断该段断裂处于破裂临界状态。与地震后应力测量结果对比,该段仍处在高应力水平状态。这个测量结果与地震学研究的结果基本符合。易桂喜等(2006)根据多项断裂活动性参数的计算,认为宝兴-大邑段以中等偏低的b值为主,指示该处的断层面正处于相对中等略偏高的应力背景。因此,龙门山西南段处于闭锁状态,应力一直处于积累状态。该段的地震危险性值得高度重视。

表6 汶川地震前沿龙门山断裂带地应力测量值
(据安其美等,2004)

Table 6 Measured stress values along the Longmenshan fault belt before the Wenchuan Ms 8.0 earthquake (from An et al., 2004)

测点	深度 (m)	S_H (MPa)	S_h (MPa)	S_v (MPa)
1	347~438	20~25	10~15	10
	100~200	6~7.5	5~7	4~5
2	200	7~9	5~7	5
3	229	14	8	6
4	240	14	10	9
5	150	16	10	4

注: S_H —最大水平应力; S_h —最小水平应力; S_v —垂向应力。

在地震震中区,震后应力值指示地壳中累积的应力得到了部分释放,但目前仍处于中等应力水平,与震前后龙门山带应力状态相近。显然,汶川地震应力释放过程与2001年昆仑山Ms8.1地震的应力

释放过程存在明显的差别。昆仑山地震震前近地表应力值高达 12MPa 左右,震后应力值降至 3MPa 左右,说明地震后应力完全释放了(Liao et al., 2003),这是走滑型地震的典型特征。而汶川地震主破裂后能量释放不彻底,沿中央断裂带上盘发生大量的余震,并持续较长时间,表明逆冲型地震后能量释放过程比较缓慢。从目前的应力水平看,震中区应力仍处于较高水平,应力将继续调整,余震发生的可能性仍然很大。

4 结论

用应力解除法获得了龙门山断裂带中南段近地表应力数据,用水压致裂法获得了浅部不同深度的应力大小。结果一致显示龙门山断裂带的应力状态为逆冲型。震中区地震后的应力值处于中等水平,主震能量释放不彻底,地壳应力仍在调整中,有余震发生的可能性。位于震中西南的龙门山断裂带南段,地震前后应力测量结果显示该段地壳应力处于较高水平(近地表约 10MPa),在这次汶川 Ms8.0 地震中,该段的能量没有释放,仍然处于闭锁状态,该段的地震活动性值得今后特别关注。靠近鲜水河断裂带并与龙门山断裂带交汇处,应力水平很低,可能与鲜水河断裂带左旋走滑活动导致的能量释放有关。

由于研究区范围大,应力测点偏少,研究结果只是初步的。今后将补充测点,并增加实时监测,随时了解应力动态变化。

致谢: 本项研究工作得到国土资源部、中国地质调查局、中国地质科学院的大力支持。感谢中国地质科学院副院长董树文研究员、地质力学研究所所长龙长兴研究员的大力支持和帮助。

注 释

① 毛吉震,李方全,张志国,陈群策,曾纪全,杨旭. 1999. 碾盘电站水压致裂应力测量报告.

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. 大地测量与地球动力学,24, 2: 115~119.
 黄媛,吴建平,张天中,张东宁. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究. 中国科学 D 辑,38(10): 1242~1249.
 李方全,孙世宗,李立球. 1982. 华北及邻庐断裂带地应力测量. 岩石力学与工程学报,1(1):73~86.
 廖榕庭,吴满路,张春山,伍刚. 2002. 青藏高原昆仑山和羊八井现今地应力测量及其工程意义. 地球学报,23(4):353~358.
 李方全. 1998. 四川西部水压致裂应力测量. 地壳构造与地壳应力

文集. 北京:地震出版社,43~49.
 李海兵,付小方,J Van der Woerd, 司家亮,王宗秀,侯立玮,邱祝礼,李宁,吴富尧,许志琴,P Tapponnier. 2008. 汶川地震(Ms 8.0)地壳破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. 地质学报,82(12):1623~1643.
 滕吉文,白登海,杨辉,闫雅芬,张洪双,张永谦,阮小敏. 2008. 2008 汶川 Ms8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报,51(5):1385~1402.
 孙世宗,李立球,李方全. 1984. 二滩电站的地应力测量. 水文地质工程地质,(2):7~10.
 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,冯系杰,于贵华,陈立春,陈桂华,于慎冉,冉永康,李细光,李陈侠,安艳芬. 2008. 汶川 Ms 8.0 地震地壳破裂带及其发震构造. 地震地质,30(3):597~629.
 易桂喜,闻学泽,王思维,龙锋,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. 中国地震,22(2):117~125.
 张培震,徐锡伟,闻学泽,冉永康. 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.
 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. 中国科学 D 辑:地球科学,38(9):1041~1056.
 张岳桥,杨农,施炜,董树文. 2008. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用. 地质学报,82(12):1668~1678.
 赵国泽,陈小斌,肖骑彬,王立凤,汤吉,詹艳,王继军,张继红,H Utada, M Uyeshima. 2009. 汶川地震 8.0 级地震成因三“层次”分析——基于深部电性结构. 地球物理学报,52(2):553~563.
 An Qimei, Ding Lifeng, Wang Haizhong, Zhao Shiguang. 2004. Research of property and activity of Longmen mountain fault zone. Journal of Geodesy and Geodynamics, 24, 2: 115~119 (in Chinese with English abstract).
 Aki K, 1984. Asperities, barriers, characteristic earthquakes and strong motion prediction. J Geophys Res, 89 (B7), 5867~5872.
 Byerlee J O. 1978. Friction of rocks. Pageoph, 116(4/5): 615~626.
 Dong Shuwen, Zhang Yueqiao, Wu Zhenhan, Yang Nong, Ma Yinsheng, Shi Wei, Chen Zhengle, Long Changxing, An Meijian. 2008. Surface ruptures and co-seismic displacement produced by the Ms 8 Wenchuan earthquake on 12th May, 2008, Sichuan, China: eastward growth of Qinghai-Tibet Plateau. Acta Geologica Sinica(English Edition), 82(5):938~948.
 Huang Yuan, Wu Jianping, Zhang Tianzhong, Zhang Dongling. 2008. Relocation study on the Wenchuan 8.0 earthquake and and its aftershock sequence. Science in China (Series D), 38(10): 1242~1249.
 Li Fangquan. 1998. Crustal stress measurement with hydraulic fracturing in west Sichuan. Crustal structure and crust stress. Beijing: Seismological Press. 43~49 (in Chinese).

- Li Fangquan, Sun Shizong, Li Liqiu. 1982. In-situ stress measurements in North China and Tancheng-Lujiang Fault Zone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1(1): 73~86 (in Chinese with English abstract).
- Li Haibing, Fu Xiaofang, J Van Der Woerd, Si Jianliang, Wang Zongxiu, Hou Liwei, Qiu Zhuli, Li Ning, Wu Fuyao, Xu Zhiqin, P Tapponnier. 2008. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1623~1643.
- Liao Chunting, Wu Manlu, Zhang Chunshan, Wu Gang. 2002. Recent ground stress measurement of the Kunlun Mountains and Yangbajing area in Qinghai-Tibet Plateau and its engineering significance. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4): 353~358 (in Chinese with English abstract).
- Liao Chunting, Shi Zhaoxian. 1983. In-situ stress measurements and their application to engineering design in the Jinchuan mine. *Proceedings of 5th International Congress on Rock Mechanics*.
- Liao Chunting, Zhang Chunshan, Wu Manlu, Ma Yingsheng, Ou Mingyi. 2003. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake. *Geophysical Research Letters*, 30(20): 20~27.
- Mao Jizhen, Li Fangquan, Zhang Zhiguo, Chen Qunce, Ceng Jiquan, Yang Xu. 1999. Report on stress measurement by hydraulic fracturing in Yaoji reservoir dam. (internal report) (in Chinese).
- Sun Shizong, Li Liqiu, Li Fangquan. 1984. Crustal stress measurement of Ertan hydropower station. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (2): 7~10 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zhaoxian, Ding Xuehu, An Qimei, Liu Zhongjian, Zhao Shiguang, Li Liqiu, Li Wen. 1991. Crustal stress measurement of Laxiwa hydropower station and the discussion of the related problem. *Proceedings of crustal tectonics and crustal stress*, (5): 167~180.
- Teng Jiwen, Bai Denghai, Yang Hui, Yan Yafeng, Zhang Hongshuang, Zhang Yongqian, Ruan Xiaomin. 2008. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan Ms8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys*, 51(5): 1385~1402 (in Chinese).
- The commission on Testing Methods, International Society of Rock Mechanics. 1987. Method 2: proposed method for measuring rock stress by hydraulic fracturing, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 24(1): 53~73.
- Wang Lianjie, Liao Chunting, Ding Yuanchen, Ou Mingyi. 1986. The Type YG-73 piezomagnetic stress gauge for rock stress measurement. *Proceedings of the International Symposium on Rock Stress and Rock Stress Measurements*, Stockholm, Sweden, 227~235.
- Wiemer S, Wyss M. 1997. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: An improved technique to calculate recurrence times? *J Geophys Res*, 102 (B7): 15115~15128.
- Wiemer S, Wyss M. 2000. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States, and Japan. *Bull Seismol Soc Am*, 90: 859~869.
- Wyss M, Schorlemmer D, Wiemer S. 2000. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto-Elsinore fault zones. *J Geophys Res*, 105 (B4): 7829~7844.
- Wyss M and Matsumura S. 2002. Most likely location of large earthquakes in the Kanto and Tokai areas, Japan, based on the local recurrence times. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 131: 173~184.
- Xu Guilin, Zhu Xiugang, Sun Shizong. 1994. Relationship between the stress field characteristics and strong earthquake activity in China. *Proceedings of Crustal Tectonics and Crustal Stress*, 7: 70~76.
- Xu Xiwei, Wen Xueze, Ye Jianqing, Ma Baoqi, Chen Jie, Zhou Rongjun, He Honglin, Tian Qinjian, He Yulin, Wang Zicai, Sun Zhaomin, Feng Xijie, Yu Guihua, Chen Lichun, Chen Guihua, Yu Shene, Rang Yongkang, Li Xiguang, Li Chenxia, An Yanfen. 2008. The Ms 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology*, 30(3): 597~629.
- Xu Zhiqin, Ji Shaocheng, Li Haibing, Hou Liwei, Fu Xiaofang, Cai Zihui. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake. *Episodes*, 31(3): 291~301.
- Yi Guixi, Wen Xueze, Wang Siwei, Long Feng, Fan Jun. 2006. Study on Fault Sliding Behaviors and Strong earthquake risk of the Longmenshan-Minshan fault zones from current seismicity parameters. *Earthquake Research in China*, 22(2): 117~125 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, Ran Yongkang. 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.
- Zhang Yueqiao, Yang Nong, Shi Wei, Dong Shuwen. 2008. Neotectonics of Eastern Tibet and its control on the Wenchuan earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1668~1678.
- Zhao Guoze, Chen Xiaobin, Xiao Qibin, Wang Lifeng, Tang Ji, Zhan Yan, Wang Jijun, Zhang Jihong, H Utada, M Uyeshima. 2009. Generation mechanism of Wenchuan strong earthquake of Ms 8.0 inferred from EM measurements in three levels. *J. of Geophysics*, 52(2): 553~563.
- Zoback M D. and Healy J H. 1984. Faulting and in-situ stress. *Annales Geophysics*, 2(6): 689~698.
- Zoback M D. and Healy J H. 1992. In-situ stress measurements to 3.5 km depth in the Cajon. *Pass Scientific Research Borehole: implications for the mechanics of crustal faulting*. *J G R*, 97 (B4): 5039~5057.

Preliminary Results of In-Situ Stress Measurements Along the Longmenshan Fault Zone After the Wenchuan Ms 8.0 Earthquake

WU Manlu,^{1,2)}, ZHANG Yueqiao^{1,2)}, LIAO Chunting^{1,2)}, CHEN Qunce^{1,2)}, MA Yinsheng^{1,2)}
WU Jinsheng³⁾, YAN Junfeng³⁾, OU Mingyi^{1,2)}

1) *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing, 100081;* 2) *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081;* 3) *The Institute of Exploration Technology, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, 611734*

Abstract

Four months after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake in western Sichuan (China), in situ stress measurements were carried out along the Longmenshan fault zone, with the purpose of obtaining stress parameters for earthquake hazard assessments. In situ stresses were measured in three new boreholes by using overcoring of the piezomagnetic stress gauges for shallow depth and hydraulic fracturing for deeper depth. The results show that the maximum horizontal stress at shallower depth ($\sim 20\text{m}$) is about 4.3 MPa, oriented $\text{N}19^\circ\text{E}$, in the epicenter area at Yingxiu Town, about 9.7 MPa, oriented $\text{N}51^\circ\text{W}$, at Baoxing County in the southwestern Longmenshan range, and about 2.6 MPa, oriented $\text{N}39^\circ\text{E}$, near Kangding in the southernmost zone of the Longmenshan range. Hydraulic fracturing at borehole depths from 100 to 400 m shows a tendency towards increasing stress with depth. A comparison with the results measured before the Wenchuan earthquake along the Longmenshan zone and in the Tibetan Plateau demonstrates that the stress level remains relatively high in the southwestern segment of the Longmenshan, and is still moderate in the epicenter zone. These results provide a key appraisal for future assessment of earthquake hazards of the Longmenshan fault zone and the aftershock occurrences of the Wenchuan earthquake.

Key words: Wenchuan Ms 8.0 earthquake; In-situ stress measurement; overcoring; hydraulic fracturing; Longmenshan fault belt