

陈群策, 丰成君, 孟文等. 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, 2012, 55(12): 3923-3932, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.005.

Chen Q C, Feng C J, Meng W, et al. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(12): 3923-3932, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.005.

## 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

陈群策<sup>1,2</sup>, 丰成君<sup>1,2</sup>, 孟文<sup>1,2</sup>, 秦向辉<sup>1,2</sup>, 安其美<sup>3</sup>

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 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

**摘 要** 5.12 汶川大地震发生后, 在龙门山断裂带东北段, 开展了 6 个钻孔的原地应力测量工作. 测量钻孔分别位于龙门山中央断裂带上下两盘的平武、北川、江油和广元等地, 钻孔孔深在 200~500 m 之间, 共取得了 72 个测试段的地应力测量数据, 以及其中 33 个测段的印模定向试验数据, 由此获得了每个测点处地应力的赋存状态, 包括地应力量值随孔深的变化以及地应力作用方向. 根据库仑准则, 结合 Byerlee 定律对各测点实测数据进行分析, 可以看出, 龙门山断裂带上盘现今地应力的作用强度高于下盘. 其上、下两盘现今地应力赋存状态特征及其差异性显示出该区域处于不均衡的应力环境, 容易导致断裂失稳而产生新的活动; 印模定向试验数据表明, 龙门山断裂带东北段的北川、江油、平武的最大水平主应力优势方向为 NEE 向; 广元附近为 NWW 或近东西方向. 结合已有的研究成果, 初步得到龙门山断裂带现今地应力作用方向的分段性特征, 即大致以北川为界, 龙门山断裂带东北段应力方向显示了与西南段不同的特征. 其西南段现今地应力的优势作用方向为北西方向, 而龙门山断裂带东北段, 自江油、北川、平武一带至广元、青川附近, 其现今地应力的最大水平主压应力的优势作用方向呈现了 NEE→NWW 的赋存状态和变化趋势. 本文获得的研究结果对于认识 5.12 汶川特大地震的动力学机制具有一定的借鉴和启示作用.

**关键词** 5.12 汶川大地震, 龙门山断裂带, 水压致裂, 地应力

doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.12.005

中图分类号 P315, P541

收稿日期 2012-04-06, 2012-11-28 收修定稿

### Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake

CHEN Qun-Ce<sup>1,2</sup>, FENG Cheng-Jun<sup>1,2</sup>, MENG Wen<sup>1,2</sup>, QIN Xiang-Hui<sup>1,2</sup>, AN Qi-Mei<sup>3</sup>

1 Key Laboratory of Neotectonic Movement and Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China

2 Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3 Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

**Abstract** In-situ stress measurements in 6 boreholes at the northeastern section of the Longmenshan fault zone were carried out after the 5.12 Wenchuan earthquake. The test boreholes, of which the depth is between 200~500 m, were at Pingwu, Beichuan, Jiangyou and Guangyuan areas, located at the hanging wall and foot wall of the Longmenshan central fault,

respectively. Totally 72 depth interval test data for stress magnitudes and 33 depth interval data for directions of the maximum horizontal principal stress were obtained. According to the Coulomb faulting criterion, combined with the Byerlee law, analysis on the in-situ stress state for each test point was carried out, indicating that the stress value at the hanging wall is much higher than that of the foot wall, implying that the fault activity is apt to be triggered. The impression packer test results show that the dominant direction of the maximum horizontal principal stress at Beichuan, Jianguyou and Pingwu is NEE, and at Guangyuan is NWW or east-west direction. Compared with the previous study results of the Longmenshan area, the current stress field zoning characteristics regarding the stress direction were obtained, i. e., the dominant stress direction of the north east section of the Longmenshan fault zone is different from that of the south west part. The dominant direction of current stress of the south west part is NW. In the north east part, from Jianguyou, Beichuan and Pingwu to Guangyuan and Qingchuan, the direction of the current stress changes from NEE to NWW. The results of this paper may be helpful for the study of the dynamic mechanism of the 5.12 Wenchuan earthquake.

**Keywords** 5.12 Wenchuan earthquake, Longmenshan Faults, Hydraulic fracturing, Geo-stress

## 1 引言

地震的孕育和发生是地壳构造应力积累超过了断层面的受力极限, 断层破裂失稳而导致应变能瞬间释放的结果. 因此, 对震源区(包括潜在震源区)地应力场的研究一直是相关领域的一个热点研究问题. 5.12 汶川特大地震发生后, 龙门山断裂带及其附近现今地应力的赋存状态引起了人们广泛的关注, 并获得了一系列研究成果<sup>[1-2, 12, 14]</sup>.

针对龙门山断裂发震机理研究, 以及该断裂带地震趋势及危险性分析等重要问题, 在深部探测技术专项项目“重要地区地应力测量与监测及构造应力场综合研究(SinoProbe-06-03)”以及地质调查项目“青藏高原东缘主要断裂带地应力监测”等项目经费的支持下, 我们自 2009 年开始, 至 2012 年初, 在龙门山断裂带东北段开展了 6 个钻孔的原地应力测量工作, 钻孔深度在 200~500 m 之间, 总计获得了 72 个测段的地应力测试数据以及其中 33 个测段的印模定向试验结果, 为研究该区域现今地应力场的赋存和分布特征提供了重要的基础资料.

已有研究表明, 龙门山断裂带现今构造活动具有分段性特征<sup>[4-5]</sup>. 具体表现为其西南、东北两段在活动周期、活动程度以及活动方式等方面存在着明显的差异性. 这些研究成果主要是基于地质调查方法而得到的运动学方面的认识, 缺乏现今构造应力场方面研究成果的支持. 本文以上述 6 个钻孔的地应力实测数据为主, 结合已有的研究成果, 对龙

门山断裂带东北段现今地应力的分布特征, 包括地应力的作用强度和作用方向进行了分析, 并给出了其分段性特征. 对于龙门山断裂带现今构造活动性以及 5.12 汶川特大地震的孕震机理研究具有一定的启示和借鉴作用.

## 2 研究区域地质构造背景

5.12 汶川大地震发生于青藏高原东缘的龙门山断裂带. 该断裂带南起泸定、天全, 向东北经灌县、茂汶、北川、广元后进入陕西勉县一带, 总体呈 NE—SW 向展布, 长约 500 km, 宽 30~40 km. 主要由龙门山后山断裂、主中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂等 4 条主干断裂及其控制的逆冲构造岩片(推覆体)组成的具有前展式发育特点的推覆构造带<sup>[3-4]</sup>.

对龙门山断裂带分段性特征调查和综合分析认为, 大致以岷山隆起东界近 SN 向虎牙断裂, 和北川至安县一线的插东断裂为界, 龙门山断裂带分为西南段和东北段(图 1). 其西南段, 受青藏高原强烈隆升的影响及其产生的侧向挤压作用, 第四纪以来一直存在明显的活动, 晚更新世以来活动强烈; 东北段自第四纪以来活动性明显减弱, 晚更新世趋于停息, 小震活动微弱. 陈国光等人从大地构造动力学环境的分析认为, 晚三叠世中晚期的印支运动, 松潘—甘孜造山带全面褶皱隆升, 并由北向南往扬子陆块逆冲推覆, 使龙门山断裂带成形, 同时控制了前陆盆地的形成和发展. 到第四纪, 由于青藏高原强烈隆升及其产生的侧向挤压作用, 使高原东北部的川青地块

向 SEE 滑动。该滑动地块不仅导致其东缘 SN 向的岷山挤压抬升,而且因岷山隆起的限制和阻挡,致使龙门山断裂带中段和西南段强烈活动,它们共同构成川青地块东部的活动边界,而龙门山断裂带东北段则被废弃,致使其活动性明显减弱<sup>[5]</sup>。

### 3 研究区水压致裂地应力测量结果及其分析

水压致裂原地应力测量是目前进行深孔应力测量最为有效的手段,也是国际岩石力学测试技术专业委员会推荐的进行岩体应力测量的主要方法之一<sup>[6]</sup>。目前,该技术方法被广泛应用于水利水电工程、深埋铁路和公路隧道、核废料处置及石油战略储备库场址选择等重大工程的勘测设计中,在地球动力学基础研究以及地震预测研究等领域也得到了重视和应用,获得了一系列重要的研究成果<sup>[7-9]</sup>。本文给出的地应力测量成果均为水压致裂地应力测量结果。

需要指出的是,在本文给出的 6 个钻孔的地应力测量结果中,现场测试程序以及数据采集、处理和计算方法严格按照相关技术规范执行<sup>[6]</sup>。对于裂缝的瞬时关闭压力,采用计算机自动取值的数据处理方法,如  $dt/dp$ 、 $dp/dt$  和单切线法<sup>[10]</sup>,并且用上述方法中不少于两种方法的结果的平均值做为最终计算结果。另外,鉴于水压致裂印模定向试验结果常常存在一定的离散性,对于每一个钻孔,在条件允许的

情况下,单孔印模段数一般不少于 5 次,有的多达 8 次以上,以此尽可能增加试验结果的可靠性。

#### 3.1 各测点地应力测量结果简介

各测点编号分别为 PW-1、QZ-1、QZ-2、QZ-3、GY-1、GY-2。其具体位置如图 1 所示。下面对各测点的相关信息和测试结果分别进行简要的介绍。

PW-1:该测点位于四川平武县木座乡和平行政村下达里自然村,紧靠省道,交通条件便利。钻孔坐标:32°37'25"N,104°29'54"E,孔口高程:1315.00 m。钻孔深度 500.00 m,揭露的地层岩性主要为震旦系上统木座组(Zbm)灰色厚块状含砾黑云母变粒岩,以及黑云母变粒岩。岩芯坚硬完整,常见连续完整的 2~3 m 岩芯柱,对于开展水压致裂应力测量十分有利。现场试验共获得了 17 个测段的有效测试数据,以及其中 7 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1)。在此需要说明的是,在表 1 中列出了 7 个测段的印模定向试验数据。实际上,现场测试进行了更多的印模定向试验,但印模效果不好,未得到清晰的印模痕迹,无法确定诱发破裂的方位。另外,在给出的 7 个测段的印模结果中,有 3 个测段的印模结果明显不同于其余 4 个测段,经现场分析认为可能是预存的裂隙张开所致,因而在计算该测点的最大水平主应力优势作用方向时予以舍弃。以下个别测点的测试结果中也存在类似问题,就不再作说明。

从该测点的测试结果中(见表 1),可以看出,在该孔孔深 99.13~439.00 m 测试深度范围内,最大水平主应力的量值范围在 4.90~46.82 MPa 之

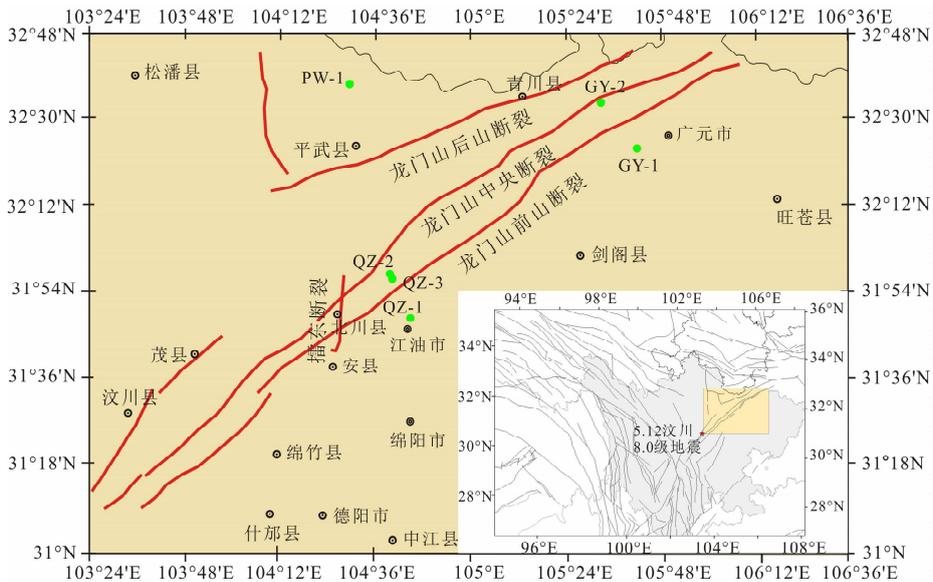


图 1 研究区主要断裂与地应力测量钻孔位置图

Fig. 1 Sketch showing main faults and location of test boreholes in the study area

表 1 汶川 5.12 大地震后龙门山断裂带东北段地应力测量结果

Table 1 Results of in-situ stress measurement of the north-east parts of Longmenshan Fault after the 5.12 Wenchuan earthquake

孔号	深度(m)	压裂参数(MPa)						应力值(MPa)			方位(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$	
QZ-1 江油	85.50	14.84	5.64	4.39	0.86	0.86	9.20	6.67	4.39	2.27	N65°E
	94.94	20.58	5.60	3.76	0.95	0.95	14.98	4.73	3.76	2.52	
	104.50	12.38	5.23	4.32	1.05	1.05	7.15	6.68	4.32	2.77	N70°E
	123.50	18.05	6.80	5.29	1.24	1.24	11.25	7.83	5.29	3.27	
	134.50	16.01	7.94	5.49	1.35	1.35	8.07	7.18	5.49	3.56	N85°E
	152.50	15.96	5.74	5.51	1.53	1.53	10.22	9.26	5.51	4.04	
	163.47	16.69	9.44	6.67	1.63	1.63	7.25	8.94	6.67	4.33	N50°E
	178.50	19.13	11.25	8.10	1.79	1.79	7.88	11.26	8.10	4.73	
QZ-2 江油	58.00	5.32	2.47	1.82	0.58	0.53	2.85	2.46	1.82	1.54	N33°E
	80.00	7.27	4.44	2.75	0.80	0.75	2.83	3.06	2.75	2.12	
	91.85	11.07	7.03	4.18	0.92	0.87	4.04	4.64	4.18	2.43	N55°E
	117.00	9.05	5.05	3.70	1.17	1.12	4.00	4.93	3.70	3.10	N53°E
	124.00	8.75	6.34	4.58	1.24	1.19	2.41	6.21	4.58	3.29	N87°E
	133.00	10.51	6.98	4.61	1.33	1.28	3.53	5.57	4.61	3.52	N58°E
	148.00	10.75	5.75	3.86	1.48	1.43	5.00	4.40	3.86	3.92	
	185.00	13.13	10.57	6.48	1.85	1.80	2.56	7.07	6.48	4.90	N58°E
195.00	9.03	7.60	5.35	1.95	1.90	1.43	6.55	5.35	5.17		
QZ-3 江油	77.00	7.59	6.38	4.27	0.77	0.74	1.21	5.70	4.27	2.04	N28°E
	86.00	4.58	3.64	2.77	0.86	0.83	0.94	3.85	2.77	2.28	N30°E
	95.50	7.79	4.13	3.37	0.96	0.92	3.66	5.05	3.37	2.53	
	105.50	8.67	6.94	5.65	1.06	1.02	1.73	8.98	5.65	2.80	N65°E
	123.00	9.26	7.48	5.46	1.23	1.20	1.78	7.71	5.46	3.26	N65°E
	133.00	8.78	6.90	5.23	1.33	1.30	1.88	7.50	5.23	3.52	
	144.00	9.91	7.34	5.60	1.44	1.41	2.57	8.06	5.60	3.82	N65°E
	152.20	10.76	7.18	5.26	1.52	1.49	3.58	7.12	5.26	4.03	
	166.00	11.49	10.54	7.68	1.66	1.63	0.95	10.88	7.68	4.40	N65°E
	176.78	10.55	7.91	7.00	1.77	1.73	2.64	11.35	7.00	4.68	
193.00	14.35	9.74	9.18	1.93	1.90	4.61	15.91	9.18	5.11	N65°E	
PW-1 平武	99.13	7.80	3.93	3.21	0.99	0.80	3.87	4.90	3.21	2.63	N45°E
	120.80	11.50	7.49	5.52	1.21	1.02	4.01	8.05	5.52	3.20	N79°E
	137.00	18.08	7.05	6.15	1.37	1.18	11.03	10.22	6.15	3.63	N10°W
	153.20	10.54	7.07	5.63	1.53	1.34	3.47	8.48	5.63	4.06	N25°W
	165.40	11.17	8.60	7.77	1.65	1.46	2.57	13.25	7.77	4.38	N4°E
	171.10	7.43	6.12	5.95	1.71	1.52	1.31	10.21	5.95	4.53	N4°E
	178.20	21.40	11.00	9.96	1.78	1.59	10.40	17.29	9.96	4.72	
	202.00	22.77	17.08	12.89	2.02	1.83	5.69	19.76	12.89	5.35	N71°E
	230.00	23.26	19.30	16.06	2.30	2.11	3.96	26.77	16.06	6.10	N45°E
	253.96	33.48	28.65	25.39	2.54	2.35	4.83	45.17	25.39	6.73	N45°E
	284.65	14.28	8.11	10.41	2.85	2.66	6.17	20.46	10.41	7.54	
	292.30	18.04	11.05	14.77	2.92	2.73	6.99	30.51	14.77	7.75	N45°E
	331.70	16.73	11.18	12.12	3.32	3.13	5.55	22.06	12.12	8.79	
348.36	22.54	12.36	11.42	3.48	3.29	10.18	18.59	11.42	9.23	N45°E	
366.00	28.64	21.03	23.77	3.66	3.47	7.61	46.82	23.77	9.70		
386.20	30.34	19.75	19.43	3.86	3.67	10.59	34.87	19.43	10.23	N45°E	
439.00	22.74	15.66	19.14	4.39	4.20	7.08	37.55	19.14	11.63		

续表 1

Table 1 (continued)

孔号	深度(m)	压裂参数(MPa)						应力值(MPa)			方位(°)
		$P_b$	$P_r$	$P_s$	$P_H$	$P_0$	$T$	$S_H$	$S_h$	$S_v$	
GY-1 盘龙	67.00	9.70	4.11	2.55	0.67	0.64	5.59	2.90	2.55	1.78	
	84.00	17.88	4.52	2.91	0.84	0.81	13.36	3.39	2.91	2.23	N72°W
	96.00	23.29	5.86	3.99	0.96	0.93	17.43	5.18	3.99	2.54	N61°W
	116.00	12.06	4.77	3.12	1.16	1.13	7.29	3.47	3.12	3.07	N70°W
	125.00	15.33	5.53	3.52	1.25	1.22	9.80	3.81	3.52	3.31	N80°E
	147.83	12.19	5.43	4.05	1.48	1.45	6.76	5.27	4.05	3.92	N84°E
	170.50	8.13	4.51	3.96	1.71	1.68	3.62	5.71	3.96	4.52	
	240.00	15.25	8.66	7.44	2.40	2.37	6.59	11.28	7.44	6.36	N68°E
	270.00	20.56	10.70	8.75	2.70	2.67	9.86	12.89	8.75	7.16	
	292.00	24.78	10.63	8.52	2.92	2.89	14.15	12.05	8.52	7.74	
GY-2 三堆	311.60	28.49	14.98	11.60	3.12	3.09	13.51	16.74	11.60	8.26	
	323.00	33.97	20.61	18.98	3.23	3.20	13.36	33.12	18.98	8.56	
	68.00	10.98	3.66	2.07	0.68	0.00	7.32	2.55	2.07	1.80	N59°W
	84.00	13.10	7.84	6.12	0.84	0.00	5.26	10.51	6.12	2.23	N66°W
	119.00	13.42	8.74	6.08	1.19	0.00	4.68	9.51	6.08	3.15	N77°W
	144.00	9.50	6.25	5.24	1.44	0.00	3.25	9.48	5.24	3.82	N75°W
	165.50	13.12	8.48	6.69	1.66	0.16	4.64	11.43	6.69	4.39	
	174.50	18.01	11.90	7.41	1.75	0.25	6.11	10.07	7.41	4.62	N23°E
	194.00	13.91	9.83	5.73	1.94	0.45	4.08	6.91	5.73	5.14	
	218.00	16.31	11.91	9.08	2.18	0.69	4.40	14.63	9.08	5.78	
	239.00	14.53	6.75	5.61	2.39	0.90	7.78	9.17	5.61	6.33	N76°E
	258.50	18.78	12.53	10.74	2.59	1.09	6.25	18.59	10.74	6.85	N88°E
	280.24	15.76	10.33	9.71	2.80	1.31	5.43	17.48	9.71	7.43	
	296.93	20.08	14.56	13.76	2.97	1.48	5.52	25.24	13.76	7.87	
	315.02	19.75	15.93	11.33	3.15	1.66	3.82	16.39	11.33	8.35	
	325.50	14.04	9.28	8.67	3.26	1.76	4.76	14.98	8.67	8.63	N65°E
	348.00	12.47	8.28	7.69	3.48	1.99	4.19	12.81	7.69	9.22	

注:  $P_b$ : 岩体原位破裂压力;  $P_r$ : 破裂重张压力;  $P_s$ : 瞬时关闭压力;  $T$ : 岩石抗拉强度;  $P_H$ : 试段深度上的水柱压力;  $P_0$ : 试段深度上的孔隙压力;  $S_H$ : 最大水平主应力;  $S_h$ : 最小水平主应力;  $S_v$ : 用上覆岩层(密度 2630 kg/m<sup>3</sup>)按静岩压力计算的垂直应力。

间;最小水平主应力的量值范围在 3.21~25.39 MPa 之间。

QZ-1:该测点位于四川江油市北大康镇附近,孔口坐标为:E104°44'58",N31°49'09",孔口高程 583.00 m. 钻孔终孔深度 200.57 m. 从钻探岩芯来看,地层主要为侏罗系上统莲花口组( $J_3l$ )紫红色细砂岩,兼有泥岩、页岩和泥灰岩. 总体来看,岩石完整、坚硬,节理裂隙不发育,有利于选择完整岩石段,开展水压致裂原地应力测量。

在该孔孔深 85.40~178.50 m 测试深度范围内,共取得了 8 个测段的地应力测试结果和其中 4 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1). 最大水平主应力的量值范围在 4.73~11.26 MPa 之间;最小水平主应力的量值范围在 3.76~8.10 MPa 之间。

QZ-2:该测点位于四川省北川县桂溪镇永利村北,孔口坐标为:E104°39'59",N31°57'46",孔口高程 628.00 m. 钻孔终孔深度 200.55 m. 从钻探岩芯来看,地层主要为泥盆系中统甘溪组( $D_2g$ )砂岩、粉砂岩. 总体来看,岩石完整、坚硬,相比较 QZ-1,岩石完整性稍差。

在该孔孔深 58.00~195.00m 测试深度范围内,共取得了 9 个测段的地应力测试结果和其中 5 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1). 最大水平主应力的量值范围在 2.46~7.07 MPa 之间;最小水平主应力的量值范围在 1.82~6.48 MPa 之间. 该孔获得的 5 个测段印模定向试验结果一致性较好。

QZ-3:该测点位于四川省北川县桂溪镇永利村

南,与 QZ-2 测点直线距离约 1.0 km. 孔口坐标为: E104°40′20″, N31°57′17″, 孔口高程 624.00 m. 钻孔终孔深度 200.40 m. 从钻探岩芯来看, 岩石地层和 QZ-2 测点相同, 主要为泥盆系中统甘溪组(D<sub>2</sub>g)砂岩、粉砂岩, 总体来看, 岩石完整、坚硬.

在该孔孔深 77.00~193.00 m 测试深度范围内, 共取得了 11 个测段的地应力测试结果和其中 3 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1). 最大水平主应力的量值范围在 3.85~15.91 MPa 之间; 最小水平主应力的量值范围在 2.77~9.18 MPa 之间.

GY-1: 测点位于广元市蟠龙镇附近, 紧邻 108 国道和绵广高速公路, 交通便利. 孔口坐标为: E105°41′38″, N32°23′47″, 孔口高程 539.00 m. 钻孔终孔深度 400.00 m. 钻孔揭露的地层主要为侏罗系中统沙溪庙组灰色块状长石石英砂岩和紫色粉砂岩.

在该孔孔深 67.00~323.00 m 测试深度范围内, 共取得了 12 个测段的地应力测试结果和其中 6 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1). 最大水平主应力的量值范围在 2.90~33.12 MPa 之间; 最小水平主应力的量值范围在 2.55~18.98 MPa 之间.

GY-2: 测点位于广元市三堆镇龙洞乡, 紧邻 212 国道. 孔口坐标为: E105°32′57″, N32°33′41″, 孔口高程 727.00 m. 钻孔终孔深度 400.00 m. 钻孔揭露的地层主要为泥盆系中统观雾山组白云岩、石英砂岩和粉砂岩.

在该孔孔深 68.00~348.00 m 测试深度范围内, 共取得了 15 个测段的地应力测试结果和其中 8 个测段的印模定向有效试验数据(详见表 1). 最大水平主应力的量值范围在 2.55~25.24 MPa 之间; 最小水平主应力的量值范围在 2.07~13.76 MPa 之间.

另外需要提及的是, 对以上各测点测试数据进行对比分析发现, 三向主应力的关系均表现为  $S_H > S_h > S_v$  (参见表 1 和图 2), 由此表明研究区浅表层地壳应力状态以水平应力作用为主的特征. 其中  $S_H$ 、 $S_h$  分别是实测的最大和最小水平主应力;  $S_v$  是根据上覆岩石埋深计算的垂向主应力, 计算公式为  $S_v = \rho gh$ , 其中,  $\rho$  为岩石密度,  $g$  为重力加速度,  $h$  为测段处上覆岩石埋深.

以下, 将主要针对地应力的量值及其作用方向, 对各测点的地应力测试数据进行进一步的分析, 以获得龙门山断裂带东北段现今地应力的分布特征.

### 3.2 对各测点地应力量值的分析和讨论

众所周知, 在地壳岩层的三维空间内, 存在着不

同尺度的不连续带和不连续面, 如断裂带、岩脉、断层、裂隙、节理等. 地壳介质的不连续性和非均质性造成了地壳应力赋存状态的非均质性和复杂性. 探测和揭示地壳应力场的非均质性, 进而获得地应力的赋存状态和空间分布规律是开展地应力测量与研究的主要目的, 也是深入研究地震孕育和发生机制的重要途径.

对以上 6 个测点的地应力测量结果进行初步分析, 可以发现, 不同测点的地应力测量结果存在一定的差异性, 比如, PW-1 测点的应力值明显偏高, 在该孔的 253.96 m、366.00 m 两个测段深度, 最大水平主应力分别高达 45.17 MPa 和 46.82 MPa. 而其余测点获得的地应力值一般不超过 15 MPa. 为了对这一现象进行深入的分析, 下面以实测数据为基础, 结合库仑破裂准则, 并引用 Byerlee 等人关于断层滑动方面的研究成果<sup>[11-12]</sup>, 对上述测点附近的地应力状态进行研究.

库仑准则指出, 如果断层面上的剪应力  $\tau$  大于或等于滑动摩擦阻力  $\mu\sigma_n$ , 则断层出现滑动. 若再引入有效应力的概念, 在可能产生滑动的断层面上最大与最小有效应力之比是“摩擦系数” $\mu$  的函数, 并表示为

$$(S_1 - P_0)/(S_3 - P_0) = ((\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu)^2, \quad (1)$$

式中  $S_1$  和  $S_3$  分别为最大与最小水平主应力值,  $P_0$  为孔隙压力,  $\mu$  为滑动摩擦系数.

若最大与最小有效主应力之比小于  $((\mu^2 + 1)^{1/2} + \mu)^2$  值, 则断层面稳定, 若大于或等于此值, 则在方位合适的层面上可能发生滑动. 关于  $\mu$  的取值, Byerlee 综合各种类型的岩石试验资料得出, 大部分岩石的摩擦系数位于 0.6~1.0 之间, 在应力值小于 100 MPa 时, 岩石的  $\mu$  值大多为 0.85<sup>[11]</sup>. 在本项分析中,  $\mu$  值上下限分别取 0.6 和 1.0.

在以上关于测量结果的介绍中, 已经知道 6 个测点的应力状态均表现为  $S_H > S_h > S_v$ . 按照以上所述的基本原理,  $S_1 = S_H$ ;  $S_3 = S_v$ . 对于给定的深度, 首先计算出垂向应力  $S_v$ , 进而根据上述公式计算出  $S_H$  的临界值, 从而分别得到对应  $\mu$  值分别为 0.6 和 1.0 的两条临界线, 如图 2 所示. 从图中可以看出, QZ-1 测点除个别测段深度外, 所有深度的最大水平主应力的实测值均位于临界线的左侧, 也就是说, 该测点最大水平主应力的量值均未超过临界应力值; 对于 QZ-2 测点, 所有测段实测应力值均在临界线的左侧. 至于 GY-2 和 GY-3 测点, 除个别测段外, 其最大水平主应力实测值均低于临界值. QZ-3 测点

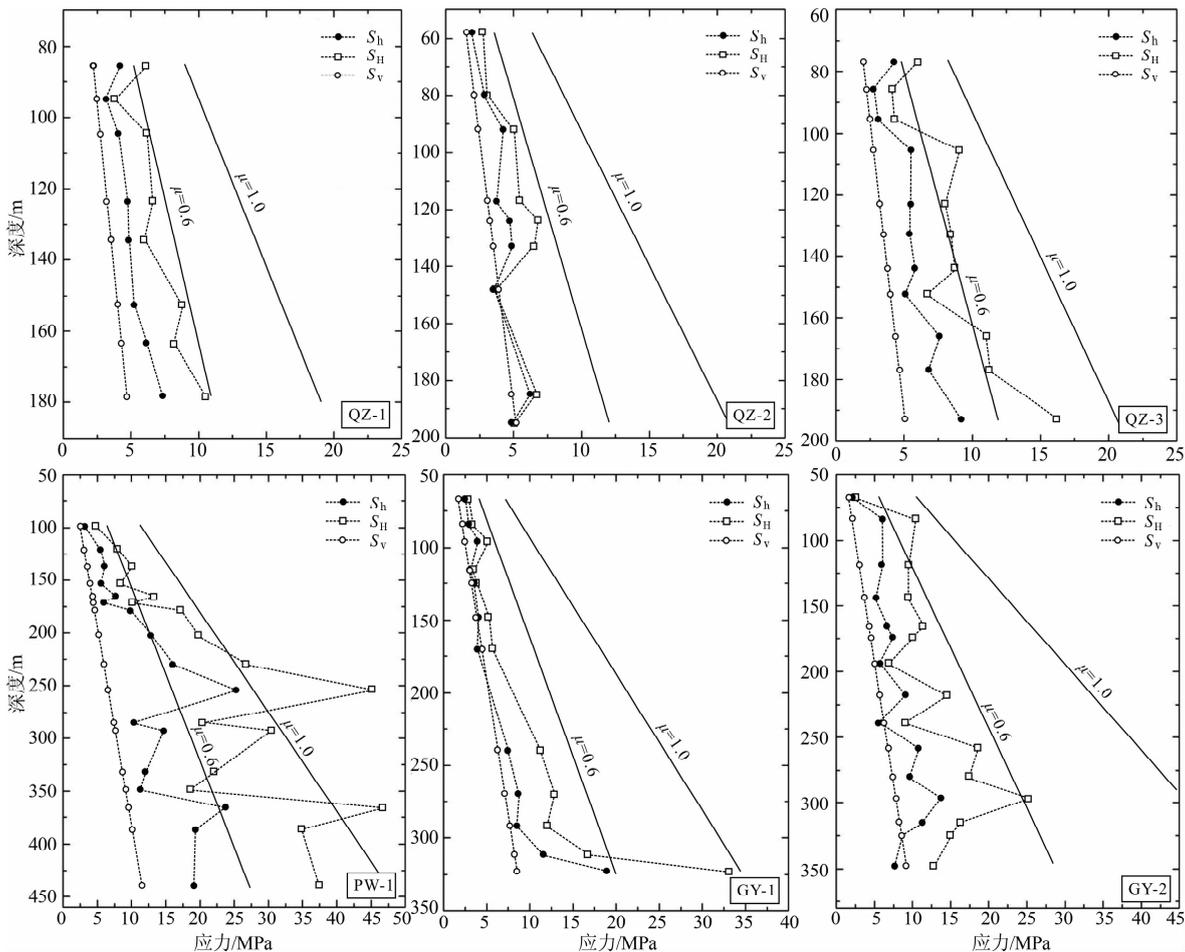


图2 各测点主应力随孔深分布示意图

Fig. 2 Distributions of principal stresses with borehole depths

较前面几个钻孔则显示出较强的断层活动性,最大水平主应力大多超过了断层滑动的最小临界值,但仍未超过最大临界值.与其他测点相比,PW-1 测点显示了明显的不同,除个别测段外,大部分测段的实测应力值超过了临界值,甚至超过了当 $\mu$ 取值为1.0时的最大临界值.

以上,利用库仑准则对各测点的应力状态进行了对比分析.实际上该准则在水库诱发地震以及油气开采中由于注水造成的断层失稳分析中应用的最为广泛,也取得了重要的研究成果和实际效益.但是此处的分析其目的并非在于讨论断裂的稳定性,而是借此分析以揭示各点现今地应力作用强度特征.从上述分析中可以看出,位于龙门山断裂带上盘的PW-1 测点,其应力作用强度明显高于位于下盘的其余测点.断裂带两侧应力作用强度存在较大的差异.

### 3.3 龙门山断裂带东北段现今地应力作用方向基本特征

除了作用强度特征以外,地应力的另一个重要

表征参数是应力作用方向.在上述6个钻孔中,通过水压致裂原地应力测量,获得了33个测段的印模定向数据.根据印模定向实验数据,确定了每个钻孔相应深度段的地应力作用方向.需要指出的是,和一般工程测量不同,在这6个钻孔的现场测量过程中,我们尽可能多地开展了印模定向实验,其目的就在于尽可能准确地获得每个测点附近最大水平主应力的优势作用方向,为该区域现今构造活动研究提供可靠的地应力基础资料.在这些印模定向实验资料中,大部分钻孔的实验数据一致性较好,但也存在个别钻孔资料较分散的现象,如PW-1 测点,在该孔所获得7个印模定向实验结果中,存在两个优势方向,其一为北东—北东东方向,其二为近南北方向.在对原始资料进行认真分析和比对的基础上,我们认为近南北方向的印模结果可能受原生裂隙的影响,不代表原地应力作用方向.在对所有原始资料进行核对和确认的基础上,对每个测点的印模定向实验数据进行了统计计算,得到其最大水平主应力的优势作用方向,结果详见表2和图3.另外,需要指出的是,

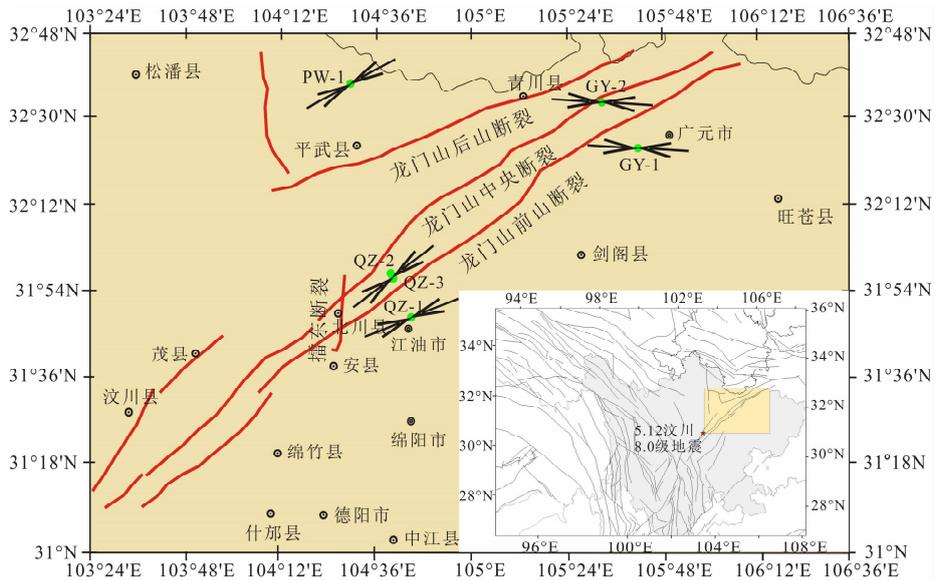


图3 龙门山断裂东北段现今地应力作用方向示意图

Fig. 3 Directions of in-situ stress around northeast section of the Longmenshan fault zone

表2 龙门山断裂带东北段现今地应力作用方向

Table 2 Directions of in-situ stress around northeast section of Longmenshan fault zone

钻孔编号	印模段数量	最大水平主应力优势作用方向	残差
QZ-1	4	NE67.5°	14.43°
QZ-2、QZ-3	8	NE51.1°	20.2°
PW-1	4	NE60°	17.6°
GY-1	6	NW85.2°	20.2°
GY-2	7	NW84°	20.4°

由于 QZ-2、QZ-3 两个钻孔相距很近(直线距离不到 1 km),且其数据结果比较接近,因而在统计计算中将两个钻孔资料进行统一计算处理,并标注在图 3 中。

关于龙门山断裂带及其周边地区现今地应力的作用方向,已有的研究主要从断裂活动特征和震源机制解分析入手,从较大的区域范围讨论龙门山断裂带及其附近区域的现今构造应力场总体特征。如张致伟等人利用汶川地震前该区域记录的数字地震波资料,测定了其震源机制解<sup>[13]</sup>,其研究表明,紫坪铺库区(汶川主震起始破裂区)和龙门山断裂带呈现的主压应力方位分别为 132.6°和 116°,与根据汶川 8.0 级地震震源机制解给出的主压应力方位(103°~122°)大体一致。谢富仁等人从应力分区的角度对中国大陆现今地应力分布特征进行了比较全面和系统的研究。在研究中,将龙门山断裂带及其附近区域划入中国大陆四级应力分区之一的龙门山—松潘应力区<sup>[14]</sup>。在该应力分区中,根据水压致裂、应

力解除、钻孔崩落、震源机制解和断层滑动资料得到的最大水平主压应力方向分布图,其优势方位集中在 80°~130°之间。但限于研究手段和研究程度所限,这些研究都未能进一步给出关于龙门山断裂带更细致的应力分区特征。

值得一提的是,刘健等人从地质构造分析入手,主要借助于断层滑动擦痕反演构造应力场的技术手段,对龙门山断裂带及其邻近区域现今构造应力作用方向特征进行了较深入的研究。其研究表明,大致以北川为界,龙门山断裂带西南段及其邻近区域的最大主压应力的方向为近水平的 NW—NWW 向,其东北段最大主压应力为近水平的 SWW—W 向<sup>[15]</sup>。这一研究结论从侧面佐证了本文给出的龙门山断裂带东北段的地应力测量结果。

基于以上分析可以认为,龙门山断裂带现今地应力的作用方向呈现出与川青块体总体格局不尽一致的现象。突出表现为,沿龙门山断裂带及其附近区域,其现今构造应力场表现为一定的分段性特征。大致以北川为界,其东北一侧的北川、江油、平武的最大水平主应力优势方向为 NEE 向;广元附近为 NWW 或近东西方向。显然有别于川青块体现今构造应力场挤压方向总体为北西方向的总体特征。对此可能的解释是,岷山隆起带可能对来自西侧的中下地壳软流物质阻挡作用,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 方向转换<sup>[15]</sup>。而远离岷山隆起带的区域,由于受到华南应力分区的影响,应力方

向又趋于 NWW 方向。因而从中央断裂的北川县—南坝镇到后山断裂的平武县—青川县主压应力方向逐渐由 NE—NEE 向 NWW 转换。

## 4 认识和讨论

本文给出了龙门山断裂带东北段 6 个测点的水压致裂原地应力测量结果,包括 72 个测段的地应力量值测试数据和 33 个测段的印模定向试验数据。根据这些实测数据,对该区域现今地应力的分布特征进行了初步的分析,得到以下认识和结论:

(1)在给出的 6 个测点数据中,位于龙门山中央断裂带上盘的平武测点,实测应力值明显高于位于下盘的其余 5 个测点。根据库仑准则,结合 Byerlee 定律对各测点实测数据进行分析,可以看出,平武测点大部分测段的最大水平主应力实测值高于  $\mu$  值取值为 0.6 对应的临界值;与之相比,其余测点在不同深度得到的实测值,除个别测段外均小于对应的临界值。据此可以初步认为,龙门山断裂带上盘现今地应力的作用强度高于下盘。龙门山断裂带上下两盘现今地应力赋存状态特征及其差异性显示该区域处于不均衡的应力环境,容易导致断裂失稳而产生新的活动。

(2)根据印模定向试验数据,获得了 6 个测点处现今地应力的优势作用方向。研究结果表明,龙门山断裂带东北段的北川、江油、平武的最大水平主应力优势方向为 NEE 向;广元附近为 NWW 或近东西方向。结合已有的研究成果,初步得到龙门山断裂带现今地应力作用方向的分段性特征,即大致以北川为界,龙门山断裂带北段应力方向显示了与其西南段不同的特征。其西南段现今地应力的优势作用方向为北西方向,与川青块体的现今构造活动特征显示了较好的一致性和协调性。而龙门山断裂带东北段则显示了与之明显有别的现今地应力作用方向特征,自江油、北川、平武一带至广元、青川附近,其现今地应力的最大水平主压应力的优势作用方向呈现了 NEE→NWW 的赋存状态和变化趋势。

(3)有关研究表明,不同应力分区之间的转换带或过渡带往往表现为应力作用方向的突然变化,相应地,应力分区之间的转换带往往是应力集中区,也是孕震和发震的危险区<sup>[16]</sup>。就此而言,作为龙门山断裂带西南和东北两个应力分区的分界和转换地带,汶川—北川一带具有发生地震的动力学条件。本文获得的研究结果对于认识 5.12 汶川特大地震的

动力学机制具有一定的借鉴和启示作用。

截至目前为止,尚未有关于龙门山断裂带应力分区的文献公开发表。本文基于龙门山断裂带东北段 6 个钻孔的地应力实测数据,结合已有的相关研究成果,对龙门山断裂带东北段现今地应力的分布特征进行了初步的分析和研究,就其现今地应力的作用强度以及作用方向特征得到了一些初步认识和结论,并进一步指出龙门山断裂带东北段有别于其西南段的现今应力场分区特征。需要指出的是,文中利用的实测资料主要限于 6 个钻孔的数据,据此得到的认识难免存在一定的局限。希望以后能够有更多可靠的地应力实测数据参与计算分析,以期获得更为全面和翔实的研究成果,为该区域地球动力学基础研究以及地震孕育和发生机理研究提供地应力依据。

## 参考文献(References)

- [1] Wu M L, Zhang Y Q, Liao C T, et al. Preliminary results of in-situ stress measurements along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83(4): 746-753.
- [2] 郭啟良, 王成虎, 马洪生等. 汶川  $M_s$ 8.0 级大地震前后的水压致裂原地应力测量. *地球物理学报*, 2009, 52(5): 1395-1401.  
Guo Q L, Wang C H, Ma H S, et al. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake of china. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5): 1395-1401.
- [3] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震. 北京: 地震出版社, 1993.  
Tang R C, Han W B. Active faults and earthquakes in Sichuan Province (in Chinese). Beijing: Seismological Press 1993.
- [4] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. *地震地质*, 1994, 16(4): 389-403.  
Deng Q D, Chen S F, Zhao X L. Tectonics, Scismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1994, 16(4): 389-403.
- [5] 陈国光, 计凤桔, 周荣军等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段初步研究. *地震地质*, 2007, 29(3): 657-673.  
Chen G G, Ji F J, Zhou R J, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since late-quaternary. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2007, 29(3): 657-673.
- [6] Haimson B C, Cornet F H. 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 & Mining*

- Sciences*, 2003, 40(7-8): 1011-1020.
- [7] 李方全, 刘光勋. 地应力测量、地壳上部应力状态与地震. 中国地震, 1986, 2(1): 50-55.  
Li F Q, Liu G X. Stress measurement, stress state of upper crust and earthquake research. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1986, 2(1): 50-55.
- [8] Zoback M D, Tsukahara H, Hickman S. Stress measurements in the vicinity of San Andreas fault: Implication for the magnitude of shear stress at depth. *J. Geophys. Res.*, 1985, 11: 6157-6173.
- [9] Zoback M D, Healy J H. In situ stress measurements to 3.5 km depth in the cajon pass scientific research borehole-implications for the mechanics of crustal faulting. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(B4): 5039-5057.
- [10] 丰成君, 陈群策, 吴满路等. 水压致裂应力测量数据分析—对瞬时关闭压力 Ps 的常用判读方法讨论. 岩土力学, 2012, 33(7): 2149-2159.  
Feng C J, Chen Q C, Wu M L, et al. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data-discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure. *Rock and Soil Mechanics* (in Chinese), 2012, 33(7): 2149-2159.
- [11] Byerlee J. Friction of rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116: 615-626.
- [12] 张伯崇. 孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响//苏枹之, 李方全, 张伯崇等. 长江三峡坝区地壳应力与孔隙水压力综合研究. 北京: 地震出版社, 1996: 166-198.  
Zhang B C. Pore pressure, fault slip criterion and influence of reservoir impounding// Su K Z, Li F Q, Zhang B C, et al. Integrated research on the stress field and pore pressure at the Three Gorges site (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 1996: 166-198.
- [13] 张致伟, 程万正, 阮祥等. 汶川 8.0 级地震前龙门山断裂带的地震活动性和构造应力场特征. 地震学报, 2009, 31(2): 117-127.  
Zhang Z W, Cheng W Z, Ruan X, et al. Seismicity and tectonic stress of the Longmenshan fault zone before 2008 Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2009, 31(2): 117-127.
- [14] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区. 地球物理学报, 2004, 47(4): 654-662.  
Xie F R, Cui X F, Zhao J T, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2004, 47(4): 654-662.
- [15] 刘健, 熊探宇, 赵越等. 龙门山活动断裂带运动学特征及其构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, (录用待刊).  
Liu J, Xiong T Y, Zhao Y, et al. Kinematic characteristics of Longmenshan active fault zone and its tectonic implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, (in press).
- [16] 崔效锋, 谢富仁, 张红艳. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义. 地震学报, 2006, 28(5): 451-461.  
Cui X F, Xie F R, Zhang H Y. Recent tectonic stress field zoning in Sichuan-Yunnan region and its dynamic interest. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 2006, 28(5): 451-461.

(本文编辑 刘少华)