

# 川西北跨度 23 a 的原地应力实测数据特征 及其地壳动力学意义分析

王成虎, 丁立丰, 李方全, 宋成科, 毛吉震

(中国地震局地壳应力研究所 地壳动力学重点实验室, 北京 100085)

**摘要:** 研究区位于龙门山断裂带北段的中央断裂带和前山断裂带之间, 该区地质结构主要为准原地体系和逆冲推覆体系, 岩性以志留系下统的泥岩、粉砂泥岩分布最广, 遍及全区。为了满足该区一工程建设的需要, 在研究范围内开展了 4 个钻孔的水压致裂原地应力测量工作, 测试时间跨度达 23 a。测试数据显示, 虽然测试时间跨度达 23 a, 但是原地应力状态基本没有变化, 研究区最大水平主应力方向的优势方向为 N24.4° W, 最大、最小水平主应力随深度线性增加的梯度分别为 0.036 和 0.025。基于实测数据计算的参数  $k_{Hmax}$ ,  $k_{Hmin}$ ,  $\mu_m$  和  $R$  在 23 a 内没有变化。该区域位于龙门山断裂带中央断裂的下盘, 为被动盘, 断层活动性和地震活动性都极其微弱, 这种特殊的区域地壳动力学条件决定了研究区稳定的区域应力场特征。通过与以往研究成果的对比分析可知,  $\mu_m$  较好地反映了该区域地壳的应力积累能力, 即从应力积累的角度反映了区域断层的强度, 这一研究与以往研究成果十分吻合。在未来的研究中, 或许可以利用实测应力资料计算的  $\mu_m$  值, 再结合区域断层和地震活动性的比较分析来评价特定区域的地震危险性。

**关键词:** 地质力学; 原地应力; 川西北; 水压致裂; 应力积累; 地壳动力学

**中图分类号:** P 55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2012)11 - 2171 - 11

## CHARACTERISTICS OF IN-SITU STRESS MEASUREMENT IN NORTHWEST SICHUAN BASIN WITH TIMESPAN OF 23 YEARS AND ITS CRUSTAL DYNAMICS SIGNIFICANCE

WANG Chenghu, DING Lifeng, LI Fangquan, SONG Chengke, MAO Jizhen

(Key Laboratory of Crustal Dynamics, The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China)

**Abstract:** The research area, in Lizhou district, Guanyuan City in the northwest Sichuan Basin, is located between the central faults and front faults of north section of Longmenshan fault belt. The major geological structural units in the research area are semi-platform unit and thrust nappe unit. The lithology is mainly mudstone and silt mudstone formed during the lower Silurian era, which are present almost all over the research area. In order to meet the requirements of one engineering establishment, the in-situ stress measurements by hydraulic fracturing method in four boreholes were accomplished; and the measurement time span was up to 23 years. The measured results indicated that: the in-situ stress state did not change in the past 23 years; the dominant orientation of the horizontal principal stresses in the research area was N24.4° W; and the stress gradients of the maximum and

**收稿日期:** 2012 - 03 - 31; **修回日期:** 2012 - 07 - 05

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金项目(40704018); 中央级科研院所基本科研业务专项资助项目(ZDJ2012 - 20); 中国地震局地震行业科研专项项目(201108008)

**作者简介:** 王成虎(1978 -), 男, 2005 年于中国地质大学(北京)地质工程专业获博士学位, 现任中国地震局地壳应力研究所四室副主任、副研究员, 主要从事地应力测量及其在工程和地震监测预报中的应用方面的研究工作。E-mail: huchengwang@163.com

minimum horizontal principal stresses vs. depth were 0.036 and 0.025, respectively. The four feature parameters,  $k_{H \max}$ ,  $k_{h \min}$ ,  $\mu_m$  and  $R$ , calculated through measured principal stresses, did not change during the 23 years. The research area is in the foot wall of the central faults of the Longmenshan fault belt, and is a passive wall. At the same time, the activities of fault movements and seismic events in the research area are extremely weak. Such a specific regional geodynamic conditions have determined the very stable stress field of this area. Comparing with the other research findings, the calculated  $\mu_m$  reflects the stress accumulative capability of the regional crust in this area, i.e. the magnitude of  $\mu_m$  reflects the strength of regional faults from the point of stress accumulation. Such a finding is consistent with the others'. In the future research, it is possible to use  $\mu_m$  values determined with the measured stresses and the corresponding data from the analysis of activities of fault movements and seismic events to evaluate the earthquake risk of one certain area.

**Key words:** geomechanics; in-situ stress; northwest Sichuan Basin; hydraulic fracturing; stress accumulation; crustal dynamics

## 1 引 言

地应力值是认识地壳动力学问题的重要参数, 应力参数的获取与分析一直都受到众多研究人员的关注。用于地壳动力学分析的应力数据主要可以分为 2 类: 一类是地球物理观测数据(或者地震学观测数据); 另外一类是岩体地应力观测数据, 包括绝对应力测量和应力、应变观测数据。S. Wiemer 等<sup>[1-5]</sup>利用震级-频度关系中的地震活动性参数的空间分布来分析和判定活动断裂带目前的相对应力水平的空间分布, 从中区分正处于相对高应力段落或者凹凸体段落。刁桂苓等<sup>[5]</sup>曾利用 CMT 震源机制解方法对 2008 年四川汶川地震和 1999 年台湾集集地震震前中小地震数据进行构造应力场分析, 发现在 2 次大震震前均出现相似的局部应力场转换现象。地震学观测数据受到观测能力和地震是否发生等因素的限制, 因而这种观测数据在很多情况下很难满足科学家研究地壳动力学问题的需求。岩体应力观测数据则能较好地满足科学家们探索的需求, 从 1966 年开始, 在全国范围内布置了大量的应力、应变观测仪器, 以观测地表岩体内地应力的变化<sup>[6]</sup>。截止 2011 年 11 月, 国家地震前兆台网中心数据库中在网运行的钻孔应力-应变监测台站共计 114 个, 分布于 28 个省、自治区和直辖市<sup>[7-9]</sup>。这些钻孔应力-应变监测台站提供了大量的地壳浅表的应力-应变长期观测数据, 但目前采用应力-应变观测数据来研究地震均采用经验法<sup>[7-8]</sup>, 观测数据与地震的孕育发生到底有何联系仍然有待研究<sup>[7]</sup>。对固体潮的观测、研究表明了钻孔应变观测确实可记录到地应力(应变)变化, 进一步的任务是把观测变化与地震结

合起来, 同时还得结合绝对应力的测量和分析<sup>[7]</sup>。

“应力图”和“应力数据库”的研究表明, 地壳浅部实测数据与地壳深部的震源机制解数据均较为一致<sup>[10-11]</sup>。且国内外研究资料表明, 在相当大的区域内, 现今构造应力的方向是相对稳定的, 有一定的分布规律, 并与地质构造和现代地壳运动有着密切联系<sup>[10-11]</sup>。由于原地应力测量技术方法的局限和测量费用高昂的原因, 在特定研究区内开展原地应力数据长期观测和重复测量变得十分困难, 因而这样的实测数据也就显得弥足珍贵。日本学者田中丰等<sup>[12]</sup>从 1978 年起, 以兵库县东南部的平木矿山和宝殿采石场作为应力测量试验场, 进行了各种原地应力测量, 并利用实测数据计算最大剪应力与平均应力的比值 $\mu_m$ , 进而分析原地应力对断层滑动的可能影响, 发现在兵库县东南部, 与以前相比, 1985 年以后  $\mu_m$  变大, 至 1994 年底,  $\mu_m$  值达 0.6, 而在 1995 年兵库县南部地震发生后, 两测点的  $\mu_m$  值降低至 0.2。C. T. Liao 等<sup>[13]</sup>利用原地应力测量方法, 在近距离短、时间内捕捉到了昆仑山西口  $M_s$  8.1 级地震前、后的地应力变化, 震后应力仅为震前应力的 1/3。郭啟良等<sup>[14]</sup>在汶川地震前、后也取得了宝贵的水压致裂原地应力测量资料, 测量结果显示, 在大震前、后应力量值的变化为 23%~29%。以上 3 个研究实例都是基于地震前、后的原地应力实测数据的变化, 而对于特定地区的长期应力观测数据的对比分析目前还很少, 因此, 针对这样的长期观测数据的深入研究对认识区域地壳动力学问题尤为可贵。

由于工程的需要, 笔者所在课题组于 1984 和 1986 年在龙门山断裂带北段四川西北部的广元地区各开展了 1 个钻孔的水压致裂原地应力测量工作; 时隔 20 多年后于 2007 年, 为了该工程的后续

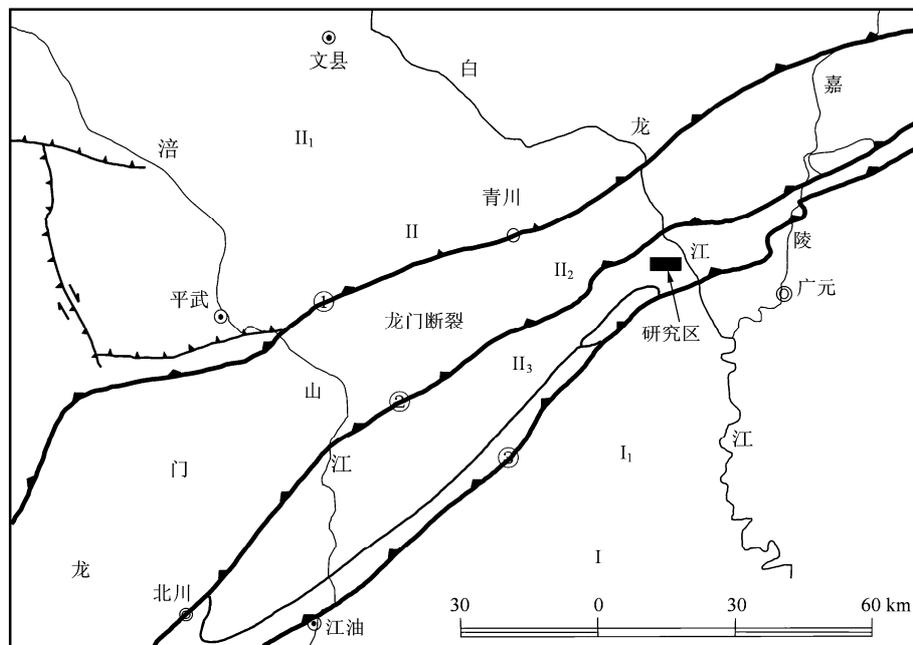
建设又开展了 2 个钻孔的水压致裂原地应力测量工作。这 4 个钻孔均布置在半径 500 m 范围内，区内地形、地貌起伏很小，而且 4 个钻孔所揭露的岩性也完全一致，因此 4 个钻孔的原地应力实测数据具备很好的可比性。通过对比分析跨度为 23 a 的 4 个钻孔的原地应力实测数据，或许可以更为深入地认识这些数据所揭示的地壳动力学含义；同时，也可结合其他方面的地壳动力学数据和事件来探索该地区的地壳动力学行为特征。

## 2 区域地质构造背景

研究区位于四川省北部的广元市利州区，地处龙门山脉北段，总体地势表现为南北高、中间低以及西部高、东部低的特征，白龙江支流平西河自西向东横贯工程区。区内西北最高山峰为飞凤山南山脊，海拔 1 030 m，西南最高山峰为燕子岩西南，海拔 1 069.5 m，中部的平西河谷海拔 513~482 m，相对高差 517~556 m，一般高差多为 150~250 m，属于中浅切割中低山区，测点位于中部河谷区域。

该区位于龙门山印支褶皱带与扬子准地台接壤部位，受到松潘—甘孜造山带自北西向南东逆冲~推覆作用的制约和影响，形成总体构造线近北东~南西向延伸的准原地体系(由志留系地层组成)和异

地的逆冲推覆体系(由南西侧的燕子岩推覆体和北侧的马伏山推覆体组成)。由志留系和残余侏罗系地层组成的准原地体系是工程区内分布最广的构造单元，占总面积的 63%；该单元总体表现为走向北东~南西，倾向北西的单斜构造；区内部发育小规模短轴褶皱，轴线与主构造线一致；局部见露头尺度的微型倾竖褶皱；变形面均为岩石的层面；大断层不发育，但层间滑动、层间破碎、露头尺度的微小断层常见。研究区的异地逆冲推覆体系由北部的马伏山推覆体和西南部的燕子岩推覆体组成，逆冲推覆构造的发生、发展过程与其所在的龙门山前山逆冲~推覆带的发展演化历程密切相关。研究区位于龙门山断裂带北段的中央断裂带和前山断裂带之间，如图 1 所示。通过对区内的断层活动性调查、分析可知，龙门山断裂带北段的后山断裂和中央断裂在第四纪早中期可能曾有活动，但是晚更新世以来不再活动，而前山断裂规模小，断层最晚活动时代应该在第四纪以前<sup>[15]</sup>，由此推测该区的地质构造运动从晚更新世以来基本停止。从本区的地质构造来看，主要构造压性结构面如褶皱轴、压性断裂等的展布为北东向，且北东向的断裂多为高角度的逆断层，活动时间近，而接近南北向的断裂多为张性断层，由此可见，构造形迹反映了本区主要受到 NNW~SSE 向压缩的应力作用方式<sup>[15-16]</sup>。



I—扬子克拉通；I<sub>1</sub>—川西前陆盆地；II—松潘—甘孜造山带；II<sub>1</sub>—摩天岭地块，II<sub>2</sub>—龙门山后山褶皱~推覆带；II<sub>3</sub>—龙门山前山逆冲~推覆带；①—青川断裂；②—北川—茶坝断裂；③—江油—马角坝断裂

图 1 研究区大地构造位置图

Fig.1 Tectonic location of research area

研究区位于扬子地层区、上扬子地层分区的西北边缘,区内出露地层有奥陶系、志留系、泥盆~石炭系、侏罗系及第四系,所有地层岩石均未经受区域变质作用改造。以志留系下统的泥岩、粉砂泥岩分布最广,遍及全区。测点附近出露的岩层主要为志留系龙马溪统底部第一岩性段,岩性为粉砂岩、泥质页岩,且以泥质页岩为主,稍夹粉砂岩;颜色为紫色或黄绿色相间;页理不很清晰,风化后大都为页片状,部分具有贝壳状断面,显泥质性质。

### 3 测试方法及测试成果

#### 3.1 测试与分析方法简介

本文所使用的地应力数据均由水压致裂应力测量法得到,水压致裂应力测量法通过水力压裂诱发裂缝的方位来确定垂直于钻孔轴的平面内主应力的方向,通过分析张开和关闭水力诱发裂缝的钻孔压力来确定主应力大小<sup>[17]</sup>。通过测试过程中实时记录的压力-时间曲线可以确定3个与应力相关的测量压力:水压致裂产生的破裂压力( $P_b$ )、水压裂缝开始闭合时的关闭压力( $P_c$ )以及水压裂重新张开时的重张压力( $P_r$ )。关闭压力是在水泵关闭后线性压力衰减曲线的拐点。M. Y. Lee 和 B. C. Haimson<sup>[18]</sup>详细阐述了这种方法。当观测到的水压裂缝为垂直或近垂直时,关闭压力可通过一次试验的多次循环求得,相当于得到最小水平主应力的值。

根据测得的压力值,可以得出如下关系式:

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

$$S_H = 3P_s - P_r - P_0 \quad (2)$$

$$T_{hr} = P_b - P_r \quad (3)$$

式中: $P_0$ 为试段深度上的孔隙水压力, $T_{hr}$ 为岩石抗拉强度, $S_H$ 为最大水平主应力, $S_h$ 为最小水平主应力。

垂直应力 $S_v$ 可根据上覆岩石的重力来计算:

$$S_v = \rho g Z \quad (4)$$

式中: $\rho$ 为岩石密度,本次计算中取 $\rho = 2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ;  $g$ 为重力加速度; $Z$ 为深度。

在计算分析过程中,除了给出最大水平主应力方向以及最大、最小水平主应力和垂直主应力外,还利用三向主应力之间的关系计算得出了 $k_{H\max}$ ,  $k_{h\max}$ ,  $\mu_m$ ,  $R$ , 计算公式分别如下:

$$k_{H\max} = S_H / S_v \quad (5)$$

$$k_{h\max} = S_h / S_v \quad (6)$$

$$\mu_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 + \sigma_3) \quad (7)$$

$$R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1) \quad (8)$$

式中: $k_{H\max}$ ,  $k_{h\max}$ 均为侧压力系数,大小分别为最大水平主应力和最小水平主应力与垂直主应力的比值,根据侧压力系数,结合Anderson理论可以判定现场是哪种断层类型的应力状态; $\mu_m$ 为平均剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 和平均主应力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的比值; $R$ 为3个主应力相对关系的应力因子。

D. B. Jamison 和 N. G. W. Cook<sup>[19]</sup>对比了应力测量数据和各类断层的关系,认为在平均剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 与平均主应力 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 的关系图上,平均剪应力与平均正应力回归曲线的斜率就是库仑摩擦因数,并认为不同类型的断层具有不同的摩擦因数,正好反映了断层形成时不同的应力状态。根据C. D. Chang等<sup>[20]</sup>的研究, $R$ 可以反映使断层滑动的最优应力组合状况,并通过模拟得到使断层滑动的最佳应力模型的 $R$ 值为0.5,即 $\sigma_2$ 的大小接近于 $\sigma_2$ 与 $\sigma_3$ 的平均值。

#### 3.2 测试成果简介

在广元市利州区研究区开展了4个钻孔的水压致裂原地应力测量工作,钻孔编号分别为GY\_ZK1, GY\_ZK2, GY\_ZK3, GY\_ZK4,对应的测试时间分别为1984年9月、1986年10月、2007年6月和2007年8月,时间跨度为23a,4个钻孔所揭露的岩性简要描述如下:

(1) GY\_ZK1 钻孔孔口高程为530.03 m,钻孔深度为530.04 m,岩芯采取率为66.32%。钻孔岩芯所揭露的岩性为粉砂岩、泥质页岩,以泥质页岩为主,稍夹粉砂岩,颜色为紫色或黄绿色相间,页理不很清晰。

(2) GY\_ZK2 钻孔孔口高程为568.48 m,钻孔深度504.31 m,岩芯采取率为55%,钻孔水位埋深为50.0 m,钻孔岩芯所揭露的岩性为粉砂岩、泥质页岩,以泥质页岩为主,稍夹粉砂岩,颜色为紫色或黄绿色相间,页理不很清晰。

(3) GY\_ZK3 钻孔孔口高程约589 m,终孔深度约601 m,静水位22.3 m,该孔岩芯相对完整。钻孔岩芯所揭露的岩性主要为紫色夹灰绿色泥质页岩,泥质结构,页理构造,岩芯较完整。岩芯一般为短柱状、柱状,长度一般为120~250 mm;裂隙不发育,很多地方发现碳酸岩细脉,产状无规则。

(4) GY\_ZK4 钻孔孔口高程约570 m,终孔孔深为601 m,孔径为110 mm,静水位到孔口约5 m。

本孔岩芯总体完整，多呈短柱状、柱状。钻孔岩性以泥质页岩为主，紫红色与灰绿色相间，泥质结构，块状构造，局部夹有碎块等。

水压致裂原地应力测量过程严格遵守 B. C. Haimson 等<sup>[17, 20-22]</sup>给出的要求，4 次测试的设备和步骤基本相同，测得的压力曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出，测试记录曲线的形态较为规则，水压破裂面的瞬时闭合压力(即最小水平主应力)在记录曲线上均较确切，因此测试成果较为准确、可信，能够真实地反映测点的原地应力分布状态。测试结束后，利用式(1)~(4)计算了测点的 3 个主应力值，利用式(5)~(8)对实测结果进行了计算，4 个钻孔各个测段的具体测量和分析成果汇总如表 1 所示。

由表 1 可知，4 个钻孔得到的应力数据所揭示的应力状态主要为逆冲断层应力状态，这与该区的主要地质构造运动性态十分吻合；同时实测数据显示，该区最大水平主应力方向为 N19°W~N31°W，优势方向为 N24.4°W，与李方全等<sup>[16]</sup>利用地质构造

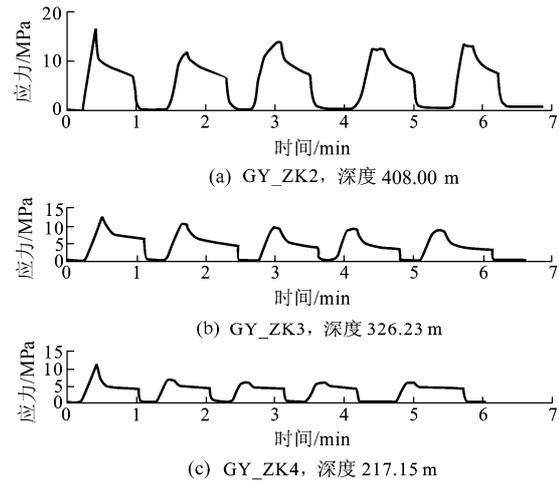


图 2 典型水压致裂地应力实测曲线

Fig.2 Typical in-situ pressure-time curves by hydraulic fracturing method

形迹分析得到的该区主要受 NNW~SSE 向压应力作用是一致的。

表 1 原地应力实测数据及计算结果汇总

Table 1 Summaries of all in-situ stress measurement data and calculated results

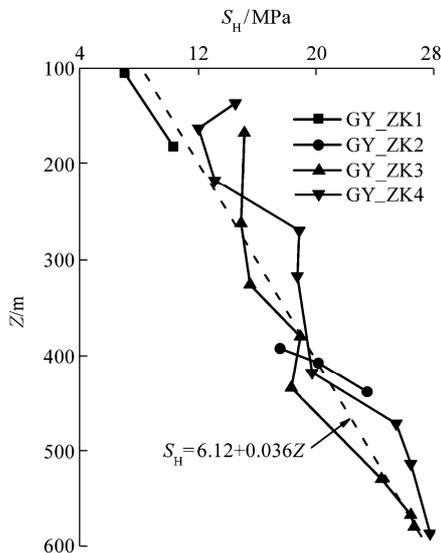
编号	测量时间	主要岩石类型	测试深度/m	应力状态	应力值/MPa			破裂方位	特征参数									
					S <sub>H</sub>	S <sub>h</sub>	S <sub>V</sub>		k <sub>H max</sub>		k <sub>h min</sub>		μ <sub>m</sub>		R			
									取值	平均值	取值	平均值	取值	平均值	取值	平均值		
GY_ZK1	1984.09	泥质页岩	106.00	TF	7.00	4.20	3.10	N20°W	2.26	2.18	1.35	1.32	0.39	0.37	0.72	0.73		
			182.00	TF	10.30	6.30	4.90		2.10	1.29	0.36	0.74						
GY_ZK2	1986.10	泥质页岩	392.66	TF	17.50	10.90	8.90	-	1.97	1.22	0.33	0.77						
			408.00	TF	20.10	12.10	9.00	-	2.23	2.22	1.34	1.36			0.38	0.38	0.72	0.71
			438.62	TF	23.40	14.30	9.50	-	2.46	1.51	0.42	0.65						
GY_ZK3	2007.06	泥质页岩	167.99	TF	15.09	8.55	4.29	N19°W	3.52	1.99	0.56	0.61						
			262.63	TF	14.87	8.90	6.70	-	2.22	1.33	0.38	0.73						
			326.23	TF	15.49	10.10	8.32	N24°W	1.86	1.21	0.30	0.75						
			380.31	TF	18.89	12.93	9.70	-	1.95	1.87	1.33	1.20			0.32	0.30	0.65	0.78
			434.39	TF	18.27	12.31	11.08	-	1.65	1.11	0.24	0.83						
			529.35	TF	24.38	14.96	13.50	-	1.81	1.11	0.29	0.87						
			566.65	TF	26.36	16.48	14.45	N28°W	1.82	1.14	0.29	0.83						
579.05	TF	26.59	17.17	14.76	-	1.80	1.16	0.29	0.80									
GY_ZK4	2007.08	泥质页岩	136.87	TF	14.50	8.59	3.50	-	4.14	2.45	0.61	0.54						
			162.85	TF	11.99	7.35	4.16	N27°W	2.88	1.77	0.48	0.59						
			217.15	TF	13.10	7.88	5.54	N22°W	2.36	1.42	0.41	0.69						
			270.15	TF	18.80	11.27	6.89	-	2.73	1.64	0.46	0.63						
			317.25	TF	18.68	11.16	8.09	-	2.31	2.26	1.38	1.43			0.40	0.38	0.71	0.67
			418.09	TF	19.67	12.72	10.66	-	1.85	1.19	0.30	0.77						
			471.65	TF	25.37	17.27	12.03	-	2.11	1.44	0.36	0.61						
513.35	TF	26.35	17.11	13.09	N31°W	2.01	1.31	0.34	0.70									
585.65	TF	27.64	19.54	14.93	-	1.85	1.31	0.30	0.64									

注：表中 TF 指逆冲断层。

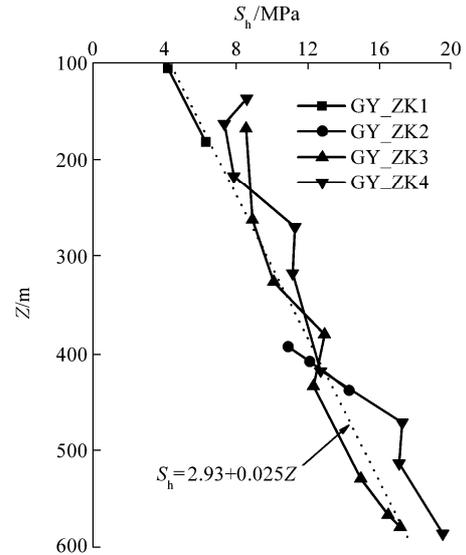
### 4 测试数据分析及讨论

#### 4.1 原地应力状态分析

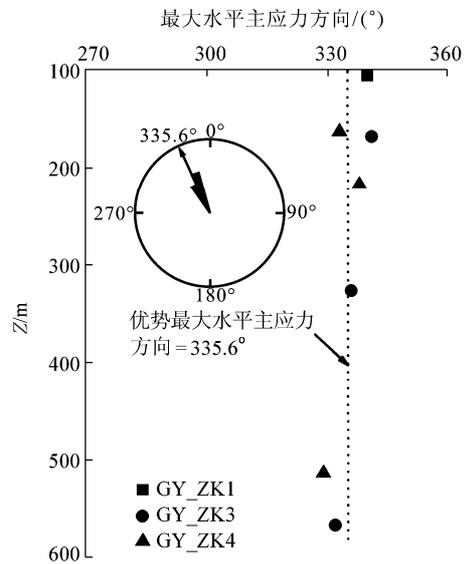
表 1 仅对实测数据进行了汇总, 为了更直观地表现 4 个钻孔所反映的区域应力状态, 将表 1 中的最大、最小水平主应力及最大水平主应力方向按照测试深度进行绘图分析, 得到的曲线如图 3 所示。如前所述, 4 个钻孔的孔口高程非常接近, 孔口高程差值最大约为 59 m, 按照垂直应力折算差值约为 1.5 MPa; 孔口高程差值最小约为 2 m, 按照垂直应力折算差值约为 0.05 MPa, 与表 1 中的主要测试结果相比均非常小, 所以孔口高程差值带来的误差对数据分析的影响几乎可以忽略不计。由图 3 可以看出, 4 个钻孔的测试时间虽然跨越了 23 a 之久, 但是反映的应力状态却较为一致, 最大、最小水平主应力量值变化较小, 完全在水压致裂法应力测量可接受的误差范围内<sup>[17]</sup>, 浅部的应力测值相对较为离散, 分析认为与地形、地貌效应及钻孔所揭露岩性局部变化密切相关。最大水平主应力方向也没有变化, 该区域的应力场方向为 NNW 向, 优势方向为 N24.4°W。对最大、最小水平主应力量值随深度的变化进行线性拟合, 得到的拟合关系式分别为  $S_H = 6.12 + 0.036Z$  和  $S_h = 2.93 + 0.025Z$ ; 线性相关性系数分别为 0.94 和 0.95, 线性相关性良好, 说明数据离散性弱, 同时也说明了该区域在这 23 年间区域应力状态稳定, 基本没有变化。最大、最小水平主应力线性拟合的斜率分别为 0.036 和 0.025, 这说明该区域深部地壳应力状态有利于逆断层和走滑断层的活动, 且应力测量值与汶川地震前、后的中小地震的震源机制解结果也基本吻合<sup>[5, 23]</sup>。



(a) 最大水平主应力



(b) 最小水平主应力



(c) 最大水平主应力方向

图 3 最大、最小水平主应力及最大水平主应力方向随深度变化

Fig.3 Variations of the maximum and minimum horizontal principal stresses and orientation of the maximum horizontal principal stress with depth

从最大主压应力方向来看, 汶川地震及其余震震源机制解所揭露的深部震源区主压应力方向为 NNW 向, 与 4 个钻孔所揭露的主应力方向不同, 这可能归咎于 2 个原因: (1) 4 个钻孔的测量数据均处于震前, 这种方向上的差异可能说明了地震前、后应力调整变化; (2) 钻孔揭露的是浅部的应力状态, 而震源机制解揭露的深部地壳应力状态, 这种方向上的差异也说明了地壳深、浅部应力状态的差异。与此同时, 震源机制解资料和 4 个钻孔所处的构造位置也有较大差异(后面将进一步分析), 对于

产生这种差异的原因, 仍然需要结合其他方面的研究成果进一步研究。

## 4.2 特征参数变化分析

为了更好地分析 4 个钻孔所揭示的应力状态及其在 23 年间所反映的应力状态变化, 本文引入了 4 个特征参数  $k_{H \max}$ ,  $k_{h \min}$ ,  $\mu_m$  和  $R$ 。侧压系数  $k_{H \max}$ ,  $k_{h \min}$  利用垂直应力分别对最大、最小水平主应力进行归一化处理, 可以消除测试深度对应力量值的影响, 以方便比较不同测试深度上的数据所反映的应力状态, 而这种处理方法也满足 Anderson 理论, 即在一个相对独立的地质单元体内, 区域应力状态是相对稳定的, 且 3 个主应力之间的相对关系也是稳定的。 $\mu_m$  是利用实测应力数据估算区域剪应力与正应力的比值, 从本质上来看, 该参数反映了区域断层的应力积累水平, 而这种应力积累与区域断层强度密切相关。 $R$  则反映了 3 个主应力的量值相互关系是否有利于区域断层的滑动。

由图 4 可以看出, 4 个钻孔所反映的  $k_{H \max}$  和  $k_{h \min}$  基本没有什么变化, 浅部的数据相对较离散, 原因主要是浅表测试数据受其他因素影响较大, 但是在 200 m 以下的数据离散程度明显降低。利用 Sheorey 模型对由实测数据计算的  $k_{H \max}$  和  $k_{h \min}$  进行拟合分析<sup>[24]</sup>, 由拟合公式可以看出, 实测数据基本按照拟合公式的变化趋势分布, 这种分布趋势与王艳华等<sup>[25-26]</sup>的研究中的分布趋势是完全一致的。

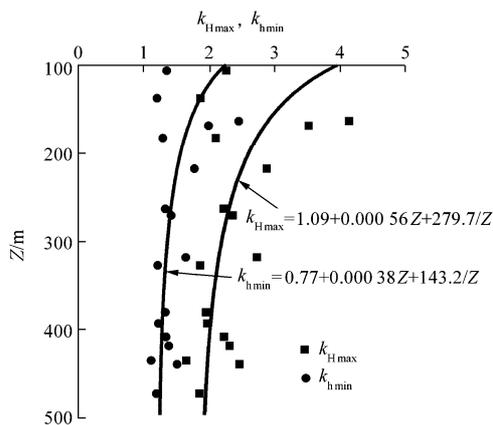


图 4 侧压系数随深度变化

Fig.4 Variations of lateral pressure coefficients with depth

$\mu_m$  和  $R$  值的计算都需要利用三向主应力  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  的具体数值, 但是在原地应力测量过程中, 能够获得  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  具体量值的机会非常少, 因此按照 Anderson 理论, 比较  $S_H$ ,  $S_h$  和  $S_v$  量值的大小, 可以近似的将其看作三向主应力值, 进而进行  $\mu_m$  和

$R$  的计算。本次分析中, 将  $S_H$ ,  $S_h$  和  $S_v$  分别看作最大、中间和最小主应力。

由图 5 可以看出, 利用这 4 个钻孔的实测应力数据计算的  $\mu_m$  和  $R$  值变化不大。将所有实测数据计算得到的  $\mu_m$  和  $R$  值求平均值, 平均值分别为 0.37 和 0.71。对  $\sigma_1 + \sigma_3$  和  $\sigma_1 - \sigma_3$  关系进行拟合, 得到  $\sigma_1 - \sigma_3 = 0.35(\sigma_1 + \sigma_3)$ , 拟合直线的斜率与  $\mu_m$  的均值基本一致, 这一结果与李方全等<sup>[27]</sup>的研究成果(0.388)基本吻合, 这就从应力积累的角度说明了该区域 23 年间的应力状态基本没有变化。基于 4 个钻孔实测数据的  $R$  值也基本没有变化, 全部数据的平均值为 0.71, 为  $\sigma_1 - \sigma_3$  和  $\sigma_1 - \sigma_2$  关系进行线性拟合, 得到  $\sigma_1 - \sigma_2 = 0.70(\sigma_1 - \sigma_3)$ , 如图 5 所示。2 种分析方法得到的结果基本一致, 同时  $R$  取值为 0.70 左右也说明这种应力状态并不有利于该区域内断层的复发活动。

## 5 地壳动力学意义分析讨论

### 5.1 与汶川地震前、后应力数据进行对比分析

如前所述, 无论是对 4 个钻孔的应力量值和方向的比较分析, 还是对特征参数  $k_{H \max}$ ,  $k_{h \min}$ ,  $\mu_m$  和  $R$  值比较分析, 都反映该区域在 23 年间应力状态稳定, 基本没有变化。该区域稳定的应力状态主要取决于其相对稳定的地壳动力学行为。按照相同的时间尺度对该区域发生的地震事件进行统计分析, 发现 1984 年以来, 该区域范围内共有 3.0 级以上地震 535 个, 4.0 级以上地震 108 个, 地震分布如图 6 所示, 图中, 3.0~3.9(3)表示发生震级为 3.0~3.9 级的地震 3 个, 其余类推。由图 6 可知, 在工程区所覆盖的区域内, 这 23 a 没有发生大于  $M_s$  3.0 级的地震事件, 即使在研究区附近方圆 50 km 的范围内, 大于  $M_s$  3.0 级的地震事件也极为稀少。这是该区域地应力状态稳定的主要原因。同时自晚更新世以来, 该区域断层基本不活动, 区域内的断层活动性极弱, 这也是地震事件少的主要原因。汶川地震之前的 10 a 内的 GPS 观测数据也显示研究区的地壳变形非常微弱, 这种微弱的变化甚至小于 GPS 的观测精度<sup>[28-29]</sup>。

笔者所在项目组在汶川地震前、后在研究区范围内也开展了几个钻孔的应力测量, 具体的研究成果见郭啟良等<sup>[14]</sup>的研究, 其中钻孔 GY\_ZK3 的位置距离本文的研究区非常近, 而且地震前后在钻孔

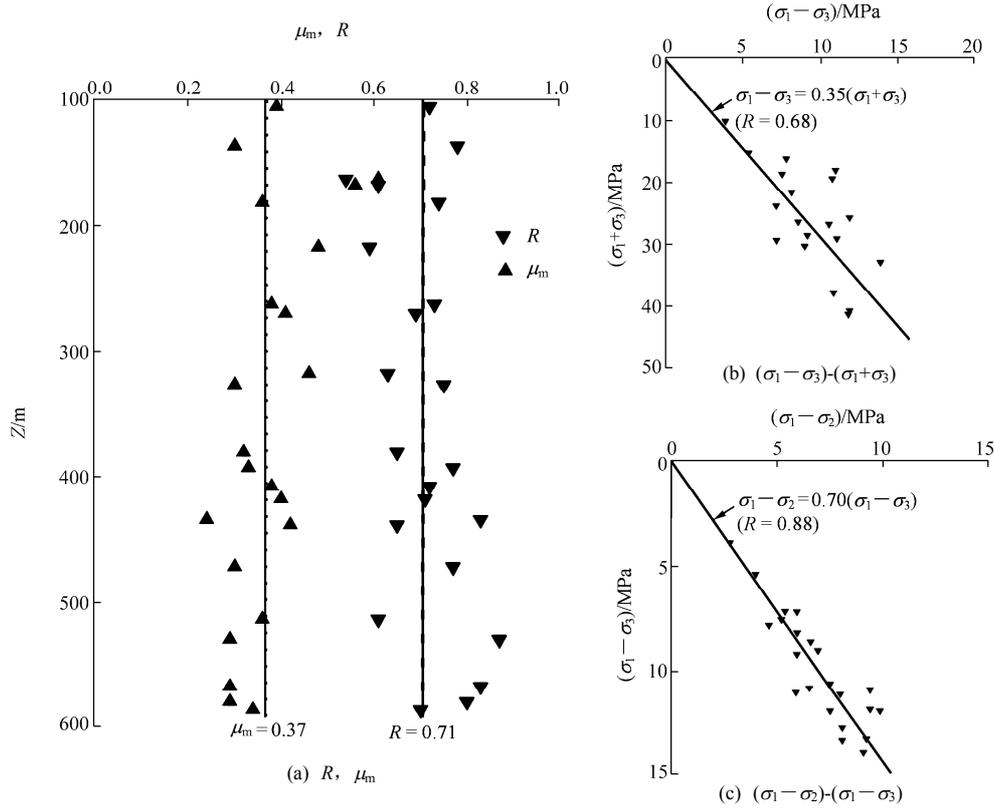


图 5  $\mu_m, R$  值随深度变化及主应力间的关系

Fig.5 Variations of values of  $\mu_m$  and  $R$  with depth and relationships of principal stresses

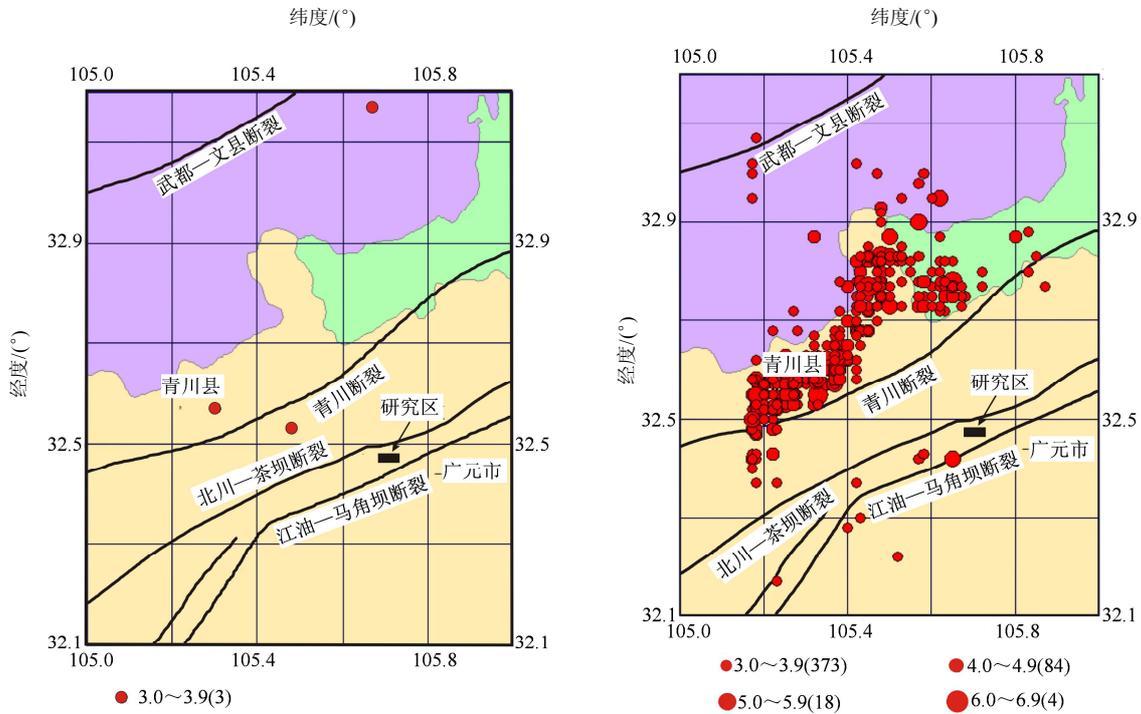


图 6 研究区周边  $M_s$  3.0 以上地震事件分布图

Fig.6 Distribution of seismic events greater than  $M_s$  3.0 around research area

GY\_ZK3 中均进行了相应的水压致裂应力测量工作。测试结果显示,地震前、后钻孔 GY\_ZK3 的应力量值几乎没有变化。郭啟良等<sup>[14]</sup>研究表明,龙门山断裂带中央断裂带下盘的应力状态在地震前、后是相对稳定的,汶川地震对发震断裂带下盘的应力状态几乎没有影响,进而指出,对于逆冲发震断层,大震前、后发震断层下盘的应力状态无明显变化。这一研究推论与该区域 20 多年来的地震事件分布(见图 6)和 GPS 数据观测结果是一致的。由图 6 可明显看出,近 20 多年来地震事件主要分布在龙门山断裂带中央断裂带的上盘区域,下盘区域几乎没有,而龙门山断裂带是公认的以逆冲为主的断裂带。

由上述研究可认为该研究区工程地质条件极为相似的 4 个钻孔,其原地应力测试时间跨度为 23 a,但所揭示的区域应力状态基本没有变化的主要原因为:该区域处于龙门山断裂带中央断裂带的下盘,而龙门山断裂带是一个以逆冲运动为主的活动断裂带,逆冲断层下盘为被动盘,应力状态相对上盘(主动盘)更为稳定,而且下盘范围内的断层活动性也十分微弱,大于  $M_s$  3.0 级的地震事件极其稀少,因此在 23 a 内应力状态基本没有变化。

## 5.2 与其他地区的应力数据进行对比分析

由上述可知,这 4 个钻孔的应力数据反映了逆冲断裂带下盘断层活动性弱、地震事件稀少地区的区域应力状态,因此,将其与其他地区的地应力数据对比分析或许能挖掘出更有价值的地壳动力学信息。

王艳华等<sup>[25]</sup>对中国大陆范围内 403 个钻孔的 1 780 个测段的应力数据进行过 $\mu_m$ 的拟合分析,其分析结果显示,当测试深度小于 500 m 时, $\mu_m$ 的取值范围为 0.0~0.5,在深度为 500~2 000 m 深度段, $\mu_m$ 的取值范围为 0.1~0.4;深度大于 2 000 m 时, $\mu_m$ 的线性集中度更好,取值为 0.21。王艳华等<sup>[25]</sup>的研究并没有按照 Anderson 理论对实测数据进行分类统计分析,因而得到的是一个没有考虑重力作用的较为宽泛的结论。D. B. Jamison 和 N. G. W. Cook<sup>[19]</sup>利用 50 组实测数据进行了 $\mu_m$ 的估算分析,其中,最深的测试数据达 1 900 m,基于实测数据,对正断层、走滑断层和逆冲断层的 $\mu_m$ 进行计算,得到的 $\mu_m$ 分别为 0.625, 0.220 和 0.427,50 组数据计算的 $\mu_m$ 的平均值为 0.522。田中丰等<sup>[12]</sup>利用长期观测数据观测到了 $\mu_m$ 在兵库县南部地震(1995 年 1 月

17 日)前、后的变化,具体如图 7 所示。

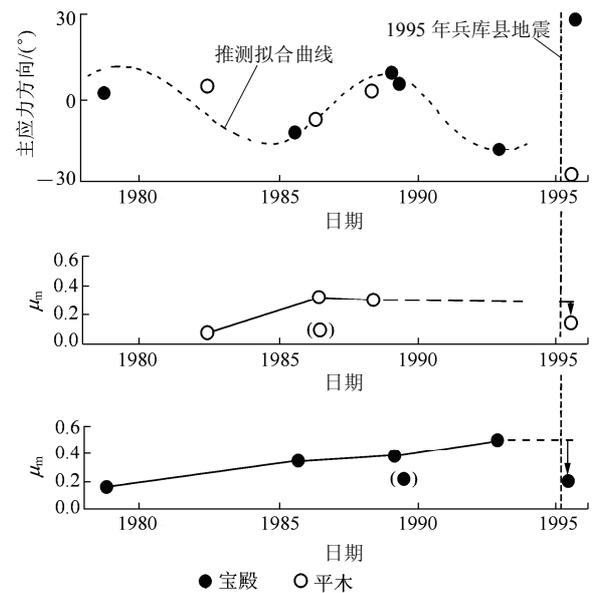


图 7 日本兵库县南部地震在地震前、后主应力方向及 $\mu_m$ 随时间的变化<sup>[12]</sup>

Fig.7 Variations of orientation of principal stresses and  $\mu_m$  vs. time before and after the Hyogo Earthquake in Japan<sup>[12]</sup>

由此可见,世界范围内很多应力实测数据计算得到的 $\mu_m$ 都分布在 0.1~0.6 范围内,而这一范围与活断层的摩擦因数相对应,利用实测应力数据计算得到的 $\mu_m$ 从另外一个角度反映了区域断层的应力积累能力。本次研究区的实测数据由于其所处的特殊区域构造位置和周边极其稀少的地震事件,23 a 观测数据计算的 $\mu_m$ 几乎没有变化,反映的区域应力状态是一种较高的状态。C. D. Chang 等<sup>[20]</sup>针对南朝鲜半岛的原地应力实测资料和区域断层活动性相互作用的研究结论也支持本文的观点,即在地震事件稀少的地方,应力值较高, $\mu_m$ 较高,而当代地震分布密度较大的地方,应力值偏低, $\mu_m$ 也偏低;同时也指出可能是断层强度的不均匀性导致了区域应力状态的不均匀性。

## 6 结 论

(1) 4 个钻孔的原地应力测试时间虽然跨度为 23 a,但是 4 个钻孔所揭示的应力状态是一致的,20 多年来,该区域的应力状态没有变化,主压应力方向为 NNW 向,优势方向为  $N24.4^\circ W$ 。

(2) 利用线性拟合得到最大、最小水平主应力

随深度的变化拟合公式分别为  $S_h = 6.12 + 0.036Z$  和  $S_h = 2.93 + 0.025Z$ ; 线性相关性系数分别为 0.94 和 0.95, 线性相关性良好。利用 Sheorey 模型拟合的最大、最小水平主应力与垂直主应力之比随深度变化的拟合公式分别为:  $k_{hmax} = 1.09 - 0.00056Z + 279.7/Z$  和  $k_{hmin} = 0.77 + 0.00038Z + 143.2/Z$ 。

(3) 由于研究区位于龙门山断裂带中央断裂下盘, 为逆断层被动盘, 区域内断层活动性十分微弱, 且该区域周边在过去的 20 多年里地震事件极其稀少, 这种特殊的区域地壳动力学背景条件造就了该区域稳定的应力场特征, 这也解释了 23 a 内应力数据没有变化的原因。

(4) 利用实测数据计算的  $\mu_m = 0.35 \sim 0.37$ , 反映了该区域相对较高的应力积累水平, 进而从应力积累角度反映了该区域的断层强度水平。通过与他人研究成果的对比分析,  $\mu_m$  是一个能较好反映区域地壳应力积累水平和区域断层强度的特征参数, 通常其范围为 0.1~0.6, 在特定的地壳动力学背景条件下, 不同的  $\mu_m$  值反映了不同程度的区域地壳应力积累水平。通过分析区域断层活动性和地震活动性特征, 结合基于长期应力观测数据的  $\mu_m$  比较分析, 或许可以用于评估特定区域的地震灾害危险性。

**致谢** 本文在收集资料过程中得到了地壳应力研究所马保起研究员和刘冬英副研究员的大力支持, 在此对他们的热忱帮助表示衷心感谢!

### 参考文献(References):

- [1] WIEMER S, WYSS M. Mapping the frequency-magnitude distribution in asperities: an improved technique to calculate recurrence times[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B7): 15 115 - 15 128.
- [2] WIEMER S, WYSS M. Minimum magnitude of completeness in earthquake catalogs: examples from Alaska, the western United States and Japan[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2000, 90(4): 859 - 869.
- [3] WYSS M, SCHORLEMMER D, WIEMER S. Mapping asperities by minima of local recurrence time: San Jacinto-Elsinore fault zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B4): 7 829 - 7 844.
- [4] WYSS M, MATSUMURA S. Most likely location of large earthquakes in the Kanto and Tokai areas, Japan, based on the local recurrence times[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2002, 131(2): 173 - 184.
- [5] 刁桂苓, 徐锡伟, 陈于高, 等. 汶川 Ms 7.9 和集集 Ms7.6 地震前应力场转换现象及其可能的前兆意义[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(1): 128 - 136.(DIAO Guiling, XU Xiwei, CHEN Yugao, et al. The precursory significance of tectonic stress field transformation before the Wenchuan Ms 7.9 Earthquake and the Chi-Chi Ms 7.6 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(1): 128 - 136.(in Chinese))
- [6] 张培耀, 张道仪, 朱万宁, 等. 四川汶川 8 级地震地应力异常——来自压磁频率应力测量系统的记录[J]. *地质学报*, 2008, 82(12): 1 788 - 1 799.(ZHANG Peiyao, ZHANG Daoyi, ZHU Wanning, et al. Anomalous earth stress of the Ms 8 Wenchuan earthquake in Sichuan, China—recording from piezomagnetic frequency measurement to the earth stress[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82(12): 1 788 - 1 799.(in Chinese))
- [7] 邱泽华, 张宝红. 我国钻孔应力-应变地震前兆监测台网的现状[J]. *国际地震动态*, 2002, 283(6): 5 - 9.(QIU Zehua, ZHANG Baohong. The present situation of the monitoring network of borehole strain-stress for earthquake precursors in China[J]. *Recent Development of World Seismology*, 2002, 283(6): 5 - 9.(in Chinese))
- [8] 邱泽华, 谢富仁, 苏恺之, 等. 发展钻孔应变观测的战略构想[J]. *国际地震动态*, 2004, 301(1): 7 - 14.(QIU Zehua, XIE Furen, SU Kaizhi, et al. Strategic development outline for borehole strain observation network[J]. *Recent Development of World Seismology*, 2004, 301(1): 7 - 14.(in Chinese))
- [9] 李海亮, 李宏. 钻孔应变观测现状与展望[J]. *地质学报*, 2010, 84(6): 895 - 900.(LI Hailiang, LI Hong. Status and developments of borehole strain observations in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2010, 84(6): 895 - 900.(in Chinese))
- [10] ZOBACK M L. First and second order patterns of stress in the lithosphere: the world stress map project[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B8): 11 703 - 11 728.
- [11] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 39 - 47.(XIE Furen, CHEN Qunce, CUI Xiaofeng, et al. *Crustal stress in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 39 - 47.(in Chinese))
- [12] 田中丰, 藤森邦夫, 大塚成昭. 地壳应力歪の測定観測による大地震发生の予測[J]. *地震*, 1998, 50(2): 201 - 208.
- [13] LIAO C T, ZHANG C S, WU M L, et al. Stress change near the Kunlun fault before and after the Ms 8.1 Kunlun earthquake[J]. *Geophysical Researcher Letters*, 2003, 30(20): 2 027 - 2 030.
- [14] 郭啟良, 王成虎, 马洪生, 等. 汶川 Ms 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*, 2009, 52(5): 1 395 - 1 401.(GUO Qiliang, WANG Chenghu, MA Hongsheng, et al. In-situ

- hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(5): 1 395 - 1 401.(in Chinese))
- [15] 李传友, 宋方敏, 冉勇康. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论[J]. 地震地质, 2004, 26(2): 248 - 258.(LI Chuanyou, SONG Fangmin, RAN Yongkang. Late quaternary activity and age constraint of the northern Longmenshan fault zone[J]. Seismology and Geology, 2004, 26(2): 248 - 258.(in Chinese))
- [16] 李方全, 刘 鹏, 张 钧, 等. 原地应力测量对某核废料处置场地评价的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 12(1): 55 - 62.(LI Fangquan, LIU Peng, ZHANG Jun, et al. Application of in-situ stress measurements to the assessment of a site for nuclear waste disposal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 12(1): 55 - 62.(in Chinese))
- [17] 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)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1 011 - 1 020.
- [18] LEE M Y, HAIMSON B C. Statistical evaluation of hydraulic fracturing stress measurement parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1989, 26(6), 447 - 456.
- [19] JAMISON D B, COOK N G W. Note on measured values for the state of stress in the earth's crust[J]. Journal of Geophysical Research, 1980, 85(B4): 1 833 - 1 838.
- [20] CHANG C D, LEE J B, KANG T S. Interaction between regional stress state and faults: complementary analysis of borehole in situ stress and earthquake focal mechanism in southeastern Korea[J]. Tectonophysics, 2010, 485(1/4): 164 - 177.
- [21] HAIMSON B C, FAIRHURST C. In-situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing[C]// Proceedings of the 11th Symposium AIME: Rock Mechanics Theory and Practices. New York: [s. n.], 1970: 559 - 584.
- [22] ZOBACK M D, HEALY J. Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique[J]. Pure and Applied Geophysics, 1977, 115(1/2): 135 - 152.
- [23] 胡幸平, 俞春泉, 陶 开, 等. 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, 2008, 51(6): 1 711 - 1 718.(HU Xingping, YU Chunquan, TAO Kai, et al. Focal mechanism solution of Wenchuan earthquake and its strong after shocks obtained from initial P wave polarity analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(6): 1 711 - 1 718.(in Chinese))
- [24] 王成虎, 郭敬良, 丁立丰, 等. 工程区高地应力判据研究及实例分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2 359 - 2 364.(WANG Chenghu, GUO Qiliang, DING Lifeng, et al. High in-situ stress criteria for engineering area and a case analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2 359 - 2 364.(in Chinese))
- [25] 王艳华, 崔效锋, 胡幸平, 等. 基于原地应力测量数据的中国大陆地壳上部应力状态研究[J]. 地球物理学报, 2012(待刊).(WANG Yanhua, CUI Xiaofeng, HU Xingping, et al. Study on stress state in upper crust in Chinese continent based on in-situ stress measuring data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012(to be published).(in Chinese))
- [26] 景 锋, 盛 谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(10): 2 056 - 2 062.(JING Feng, SHENG Qian, ZHANG Yonghui, et al. Research on distribution rule of shallow crustal geostress in China mainland[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(10): 2 056 - 2 062.(in Chinese))
- [27] 李方全, 张 钧, 刘 鹏, 等. 四川西部水压致裂深部应力测量[C]// 地壳构造与地壳应力文集. 北京: 地震出版社, 1988: 43 - 49.(LI Fangquan, ZHANG Jun, LIU Peng, et al. Hydro-fracturing in-situ stress measurements in deep boreholes in the Northwest of Sichuan Basin[C]// Proceedings of the Institute of Crustal Dynamics. Beijing: Seismology Publishing House, 1988: 43 - 49.(in Chinese))
- [28] GAN W, ZHANG P, SHEN Z K, et al. Present-day crustal motion within the Tibetan Plateau inferred from GPS measurements[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(B8): 1 - 14.
- [29] 张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008 年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式[J]. 科学通报, 2009, 54(7): 944 - 953.(ZHANG Peizheng, WEN Xueze, XU Xiwei, et al. Tectonic model for the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(7): 944 - 953.(in Chinese))