

大地震前后实测地应力状态变化及其意义

——以龙门山断裂带为例

秦向辉^{1,2}, 陈群策^{1,2}, 孟文^{1,2}, 谭成轩^{1,2}, 张重远^{1,2}, 丰成君^{1,2}

(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)

摘要: 实测地应力状态在连续地震事件前后的变化特征, 对于应用地应力实测数据探索开展地震预报等研究有重要意义, 但一直以来缺少典型实例研究。以龙门山断裂带西南段的跷碛和映秀地区为研究区, 利用该地区汶川地震前至芦山地震后获得的地应力实测数据, 分析了表征地应力状态的特征参数在汶川和芦山地震事件前后变化特征, 探讨了其对地震预报研究的意义。研究表明, 跷碛地区地应力状态特征参数 K_{HV} 、 K_{hh} 和 μ_m 变化表现为芦山地震后值 (QQ-14) 大于汶川地震前 (QQ-99), QQ-99 结果大于汶川地震后值 (QQ-09), 而主应力梯度系数变化为 $QQ-09 > QQ-14 > QQ-99$; 分析认为 K_{HV} 、 K_{hh} 和 μ_m 变化规律能准确反映汶川和芦山地震事件前后跷碛地区构造应力场演化特征, 而仅用主应力随深度变化梯度系数变化特征, 不能完全准确地反映构造应力场调整变化情况; 映秀地区, 除 K_{hh} 外, 主应力随深度变化梯度系数、 K_{HV} 和 μ_m 均表现为汶川地震后结果大于震前, 其变化反映的应力场调整变化特征需要补充数据检验; 利用地应力状态参数变化规律开展地震预报探索研究时, 长期的、可对比的高质量地应力测量数据是研究有所突破的关键。研究成果对于龙门山地区构造应力场和减灾防灾研究有重要意义, 对于应用地应力数据探索开展地震预报研究等有参考价值。

关键词: 地应力; 地震; 特征参数; 龙门山断裂带; 地震预报

中图分类号: P553

文献标识码: A

EVALUATING MEASURED IN-SITU STRESS STATE CHANGES ASSOCIATED WITH EARTHQUAKES AND ITS IMPLICATIONS: A CASE STUDY IN THE LONGMENSAN FAULT ZONE

QIN Xianghui^{1,2}, CHEN Qunce^{1,2}, MENG Wen^{1,2}, TAN Chengxuan^{1,2},
ZHANG Chongyuan^{1,2}, FENG Chengjun^{1,2}

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences (CAGS), Beijing 100081, China;

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

Abstract: Evaluating measured in-situ stress state changes associated with large earthquake events plays a crucial role in earthquake prediction using measured in-situ stress data, whereas typical examples were not stated systematically yet. In this study, the Qiaoqi and Yingxiu regions which contain measured in-situ stress data crossing two large earthquakes (the Wenchuan earthquake and the Lushan earthquake)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41702351); 国家科技重大专项 (2016ZX05034-003); 中国地质调查局项目 (121201104000150003)

作者简介: 秦向辉 (1984-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事地应力测量与监测、构造应力场等研究工作。E-mail: qinxiangh03@126.com

收稿日期: 2018-03-10; 修回日期: 2018-05-03

吴芳编辑

were selected as examples to study this issue. The changes of the stress state before and after the Wenchuan and Lushan earthquakes in the Qiaopi and Yingxiu regions were analyzed by comparing the magnitudes of gradient coefficient, characteristic indexes K_{HV} (ratio of the maximum horizontal stress to vertical stress), K_{Hh} (ratio of the maximum horizontal stress to minimum horizontal stress), and μ_m (shear stress normalized by average stress) obtained before and after these two earthquakes. The results indicate that the average magnitudes of K_{HV} , K_{Hh} , and μ_m obtained after the Lushan earthquake (QQ-14) in Qiaopi region are larger than those obtained before the Wenchuan earthquake (QQ-99); and the mean magnitudes of these parameters obtained from QQ-99 are larger than those obtained after the Wenchuan earthquake (QQ-09). However, the evolution feature of gradient coefficient before and after these two earthquakes can be characterized by QQ-09 > QQ-14 > QQ-99. Based on above estimation, it was stated that the changes of K_{HV} , K_{Hh} , μ_m can reflect the evolution trend of the regional tectonic stress filed in Qiaopi region, while the gradient coefficient can not reflect the evolution feature accurately enough. The magnitudes of gradient coefficient, K_{HV} , and μ_m obtained from measured in-situ stress data after the Wenchuan earthquake exceed those after this large earthquake in Yingxiu region, while the K_{Hh} shows contradictory trend. The tectonic stress evolution in Yingxiu region should be verified by supplementing additional stress data. Long-term measured in-situ stress data which can be compared is the key element in significant breakthrough of earthquake prediction using the change laws of stress state characteristics parameters. Conclusions drawn in this study is of great significance for tectonic stress field estimation and disaster prevention and reduction in Longmenshan region, and can provide reference for earthquake prediction research.

Key words: in-situ stress; earthquake; characteristic parameter; the Longmenshan fault zone; earthquake prediction

0 引言

地震是地球内部地应力和能量积累达到极限状态,通过地壳快速破裂、错动等形式突然释放的一种现象^[1-3]。地震的发生势必造成地应力场的变化、调整,距离震中远近和方位不同的区域,其地应力调整情况也存在差异^[4-5],如李方全等^[6]在华北及郯庐断裂带的地应力测量结果显示,震后震中区地应力和最大剪应力水平要低于远离震中地方,震中区主应力方向可能发生显著变化,需要一段时间调整后才能恢复到与区域构造应力场的方向一致;田中丰等^[7]发现基于实测数据计算的最大剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ 与平均应力 $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ 比值 μ_m 在1995年兵库县南部地震发生前增加,地震后出现显著的降低;Liao等^[8]利用地应力测量方法在短时间内捕捉到昆仑山西口 M_s 8.1级地震前后的地应力调整变化,结果显示震后地应力水平仅为震前应力的1/3;Yamashita等^[9]发现1995年日本神户地震后地应力大小和差应力水

平较震前都有所降低。基于上述认识,2008年汶川 M_s 8.0级地震后,为查明龙门山地区地应力场特征及其调整情况,分析龙门山地区汶川震后的地震危险性,国内学者沿龙门山断裂带开展了地应力测量研究工作,郭启良等^[10]发现四川广元地区中央断裂带上震后最大、最小主应力值比震前分别降低了29%和23%,且剪应力随远离断裂而减小;Wu等^[11]和秦向辉等^[12]对比分析地震前后地应力数据,指出龙门山断裂带西南段长期积累的地应力并未因汶川地震发生而彻底释放,仍处于较高水平,断裂带西南段再次发生大震可能性较高;丰成君等^[13]分析北川—江油地区实测地应力数据后,指出震后该区域地应力值随着距离断裂远近不同出现不同程度的减小;陈群策等^[14]和孟文等^[15]指出实测最大水平主应力方向沿龙门山断裂带表现出分区性,其特征与龙门山断裂带构造分段特征基本一致;Meng等^[16]、Wang等^[17]和Qin等^[18]研究表明沿龙门山断裂带地应力作用强度表现为西南段强,中段较弱,东北段中强的特征。2013年芦山地震,初步证实了前述基于实测

地应力数据而获得的地震危险性认识和结论^[11-12],芦山地震后,Wu等^[19]又在碛碛地区开展了地应力重复测量,结果表明龙门山断裂带西南段的碛碛地区依然处于较高应力水平,芦山地震后该区域断裂失稳活动可能性依然偏高,潜在地震危险性依然存在。

上述研究和成果提高了关于地应力状态在地震前后调整变化的认识水平,促进了应用实测地应力数据开展地震预报等研究。尽管如此,要更加准确认识地应力状态变化与地震关系,有效指导减灾防灾等,前述研究中还有一些问题值得深入研究:由于目前依然不能准确预测地震,有关实测地应力状态变化与地震事件关系的分析主要限于单次地震事件,对于同一地区或相近区域两次及以上地震事件过程中地应力状态的变化调整研究甚少,如果能获得跨越多次地震事件前后的地应力实测数据,开展两次及以上地震事件前后地应力状态变化研究,详细查明哪些地应力状态特征参数对地震事件有良好的响应,可以用来反映地应力状态在地震前后变化情况,就能更好的利用实测地应力数据开展地震预报研究等工作。

针对上述问题,在龙门山地区地应力场研究已有成果基础上,选取相继发生汶川地震和芦山地震的龙门山断裂带西南段的碛碛和映秀地区为研究区,筛选出跨上述两次大地震事件的实测地应力数据,对部分地应力状态特征参数在汶川、芦山地震前后变化情况进行了计算,并分析了地震前后地应力状态变化规律,从而探讨了地应力状态特征参数对地震响应情况及其在地震预报研究中的意义。研究成果对于龙门山地区构造应力场研究、减灾防灾,以及应用地应力数据开展地震预报探索性研究等有重要意义。

1 区域地质背景

龙门山地区位于青藏高原东缘,构成了青藏高原和四川盆地的分界,其西侧为松潘—甘孜褶皱系,东侧为扬子地台,西南侧为川滇菱形块体,北侧为秦岭造山带^[20-21]。受印度板块向欧亚板块俯冲碰撞及其持续北东向推挤导致的高原物质东移的影响^[22],龙门山地区自新生代以来经历了强烈的地壳变形和断裂作用,造成区内不同走向和规模的断裂纵横交错,其中的龙门山断裂带最具

代表性。龙门山断裂带总体呈北东-南西向展布,由一系列不同规模的北东—南西向断裂带和推覆构造体组成(见图1),该断裂晚第四纪以来被认为以逆冲右旋走滑运动为主,其自西向东分别为:汶川—茂县断裂、映秀—北川断裂、安县—灌县断裂和山前隐伏断裂以及其相应的推覆体^[23-24],其中映秀—北川和安县—灌县断裂是龙门山断裂带的主要断裂,尤其是映秀—北川断裂带为龙门山地形陡变带的边界,它们的活动控制着龙门山的隆升和变形破坏^[25-26]。上述断裂将青藏高原东部龙门山地区由西向东划分为古生代变质地体、以彭灌杂岩体和宝兴杂岩体为代表的前寒武纪变质杂岩、广泛发育的三叠系含煤系地层和侏罗系前陆盆地^[25,27-28]。

2 地应力数据

如前所述,汶川地震后,国内学者沿龙门山断裂带开展了包括压磁应力解除法、水压致裂法和滞弹性应变恢复法在内的大量地应力测量工作,测量深度从地表下几十米至千米不等。通过对上述数据分析,并基于如下原因,选取了龙门山断裂带西南段碛碛地区和映秀地区开展研究:首先,碛碛地区涵盖了碛碛电站1999年地应力数据(QQ-99)^[11]、碛碛电站2009年地应力数据(QQ-09)^[29]和碛碛电站2014年地应力数据(QQ-14)^[19],构成了跨汶川地震和芦山地震两次大震事件地应力数据序列,映秀地区涵盖了映秀2002年地应力数据(YX-02)^[17]和2009年地应力数据(YX-09)^[11],构成了跨汶川地震地应力数据序列;其次,尽管碛碛—映秀地区五年时间内相继发生了两次大震,但是两次地震后该区域余震总体相对较少^[30],其现今构造应力场演化特征值得持续关注和研究。上述地应力测量方法和地应力数据的准确性已在相关文献分析过^[11,17,19,29],此处不再详述,但是为了更进一步减少浅地表地形^[31-32]、局部构造^[33-34]等因素的影响,并增加数据可对比性,对于YX-09数据,仅使用了其水压致裂地应力数据,未使用近地表压磁解除地应力数据。碛碛和映秀地区地质构造及地应力钻孔分布分别见图2和图3,其地应力数据分别见表1和表2。

3 分析方法

要描述一个地区的地应力状态,需要确定其

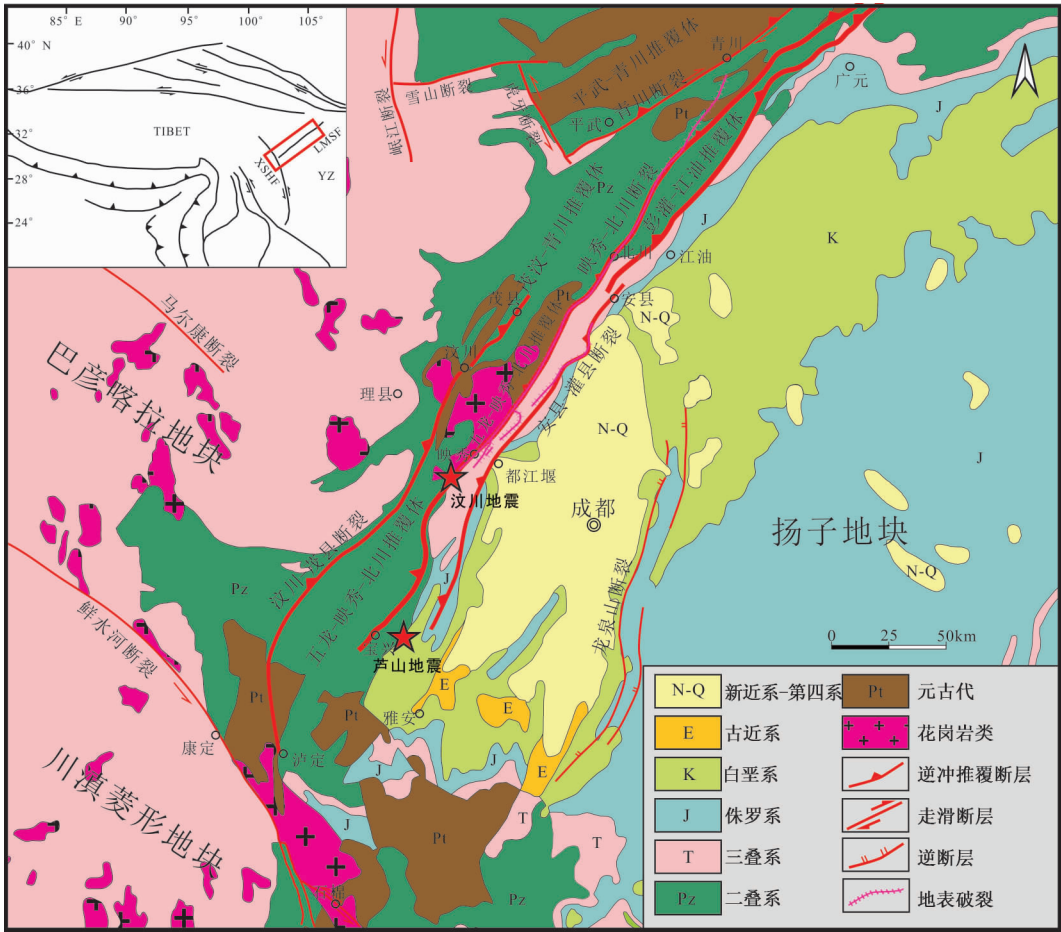
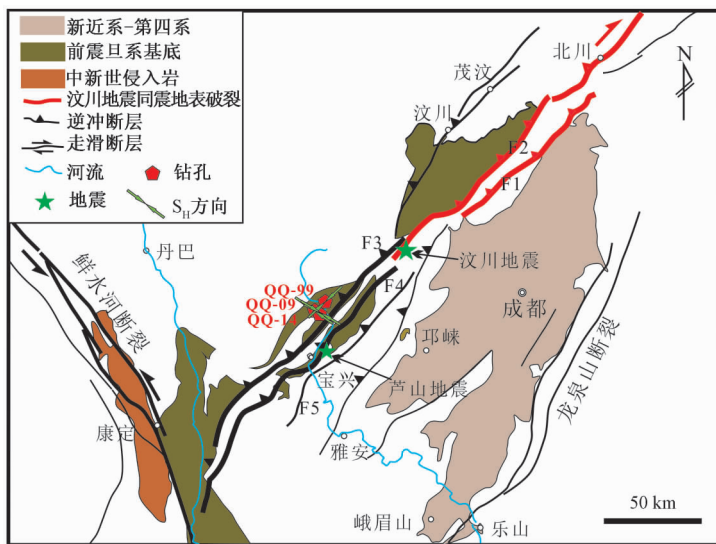


图 1 龙门山及邻区区域地质简图

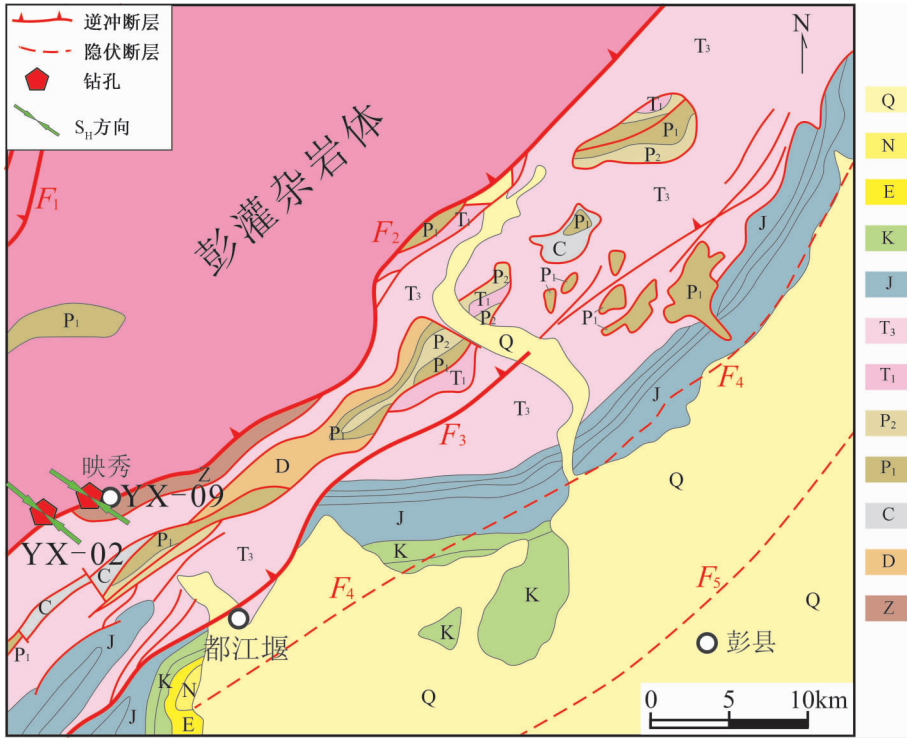
Fig. 1 Geological sketch map of the Longmenshan and adjacent regions



F1—映秀—北川断裂；F2—汶川—茂县断裂；F3—盐井—五龙断裂；F4—双石—大川断裂；F5—大邑断裂

图 2 晓碛地区地质构造与地应力钻孔分布图 (据文献[19]修改)

Fig. 2 Local geological map of Qiaoyi region showing locations of boreholes used in this study (modified after [19])



F1—汶川—茂县断裂; F2—映秀—北川断裂; F3—灌县—安县断裂; F4—关口隐伏断裂; F5—彭县隐伏断裂

图3 映秀地区地质构造与地应力钻孔分布图 (据文献[35]修改)

Fig. 3 Local geological map of Yingxiu region showing locations of boreholes used in this study (modified after [35])

表1 硃碛地区地应力数据

Table 1 In-situ stress data obtained in Qiaoqi region

钻孔	深度/m	S_H /MPa	S_h /MPa	S_v /MPa	S_H 方向/ (°)	K_{HV}	K_{Hh}	μ_m
QQ-99 ^[11]	180.25	15.42	8.28	4.77		3.23	1.86	0.53
	187.55	14.44	8.19	4.96	N57°E	2.91	1.76	0.49
	224.44	20.86	11.61	5.49	N63°E	3.80	1.80	0.58
	233.29	18.07	11.11	6.18	N1°W	2.92	1.63	0.49
	241.15	8.97	5.68	6.38		1.41	1.58	0.22
	250.33	19.74	10.80	6.63	N55°E	2.98	1.83	0.50
	259.10	21.38	11.68	6.86		3.12	1.83	0.51
	264.37	7.65	5.39	7.00	N22°E	1.09	1.42	0.17
	275.07	11.90	6.41	7.28		1.63	1.86	0.30
	280.46	25.53	13.53	7.42	N39°E	3.44	1.89	0.55
QQ-09 ^[29]	80.50	5.25	4.15	2.13		2.46	1.27	0.42
	117.50	6.66	5.22	3.11		2.14	1.28	0.36
	135.00	5.25	4.73	3.58		1.47	1.11	0.19
	167.00	5.47	5.09	4.43		1.23	1.07	0.11
	174.50	13.06	9.51	4.62	N49°W	2.83	1.37	0.48
	192.07	15.27	12.09	5.09	N60°W	3.00	1.26	0.50
	201.27	18.63	13.13	5.33		3.50	1.42	0.56
214.37	23.73	14.78	5.68		4.18	1.61	0.61	
QQ-14 ^[19]	128.00	21.93	11.18	3.39	N85°W	6.47	1.96	0.73
	136.00	19.60	10.47	3.60	N63°W	5.44	1.87	0.69
	159.00	21.97	11.71	4.21		5.22	1.88	0.68
	182.00	25.83	18.47	4.82	N73°W	5.36	1.40	0.69
	188.00	21.02	11.51	4.98		4.22	1.83	0.62

注: S_H 和 S_h 分别为实测最大、最小水平主应力, S_v 为垂向应力, 按照等于上覆岩层重度计算, 岩石平均密度取 2.65 g/cm³。

表 2 映秀地区地应力数据

Table 2 In-situ stress data obtained in Yingxiu region

钻孔	深度/m	S_H /MPa	S_h /MPa	S_V /MPa	S_H 方向/ ($^\circ$)	K_{HV}	K_{Hh}	μ_m
YX-02 ^[17]	246.70	7.47	4.57	6.67		1.12	1.63	0.24
	300.00	12.55	7.20	8.11		1.55	1.74	0.27
	354.20	13.80	8.10	9.58		1.44	1.70	0.26
	422.20	16.58	9.83	11.41	N47°W	1.45	1.69	0.26
	476.20	20.62	12.12	12.87		1.60	1.70	0.26
	611.40	19.17	12.42	16.51	N54°W	1.16	1.54	0.21
	677.10	21.23	13.43	18.29		1.16	1.58	0.23
	705.70	26.36	16.16	19.07	N53°W	1.38	1.63	0.24
733.20	28.04	17.14	19.81		1.42	1.64	0.24	
YX-09 ^[11]	90.00	3.48	2.60	2.39		1.46	1.34	0.19
	128.00	8.34	7.44	3.39		2.46	1.12	0.42
	142.00	7.81	5.95	3.76	N56°W	2.08	1.31	0.35
	171.00	15.62	11.81	4.53		3.45	1.32	0.55
	178.00	16.36	9.68	4.72		3.47	1.69	0.55
	185.00	13.11	8.35	4.90		2.68	1.57	0.46

注: 表 2 符号意义同表 1。

主应力大小、主应力方向和应力结构, 此外还可以用一些无量纲特征参数来描述地应力状态, 主要有主应力随深度变化梯度系数、侧压系数^[36], 反映最大水平主应力作用强度的参数 K_{HV} 、反映水平向差应力相对大小的参数 K_{Hh} , 以及反映剪应力相对大小的参数 μ_m ^[7] 等, 以往研究成果也显示了上述参数能够有效反映区域地应力状态差异性^[7, 33, 36-37], 因此, 选取了主应力随深度变化梯度系数、 K_{HV} 、 K_{Hh} 和 μ_m 来描述地震前后地应力状态, 并通过上述参数的具体变化来研究地震前后地应力状态的变化特征, 上述几个参数计算公式如下:

$$K_{HV} = S_H/S_V \quad (1)$$

$$K_{Hh} = S_H/S_h \quad (2)$$

$$\mu_m = (\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (3)$$

公式中, σ_1 、 σ_3 分别为主应力条件下最大、最小主应力; S_H 、 S_h 和 S_V 分别为地应力测量中最大、最小水平主应力和垂向应力。

4 结果

4.1 碛碛地区地应力状态参数变化特征

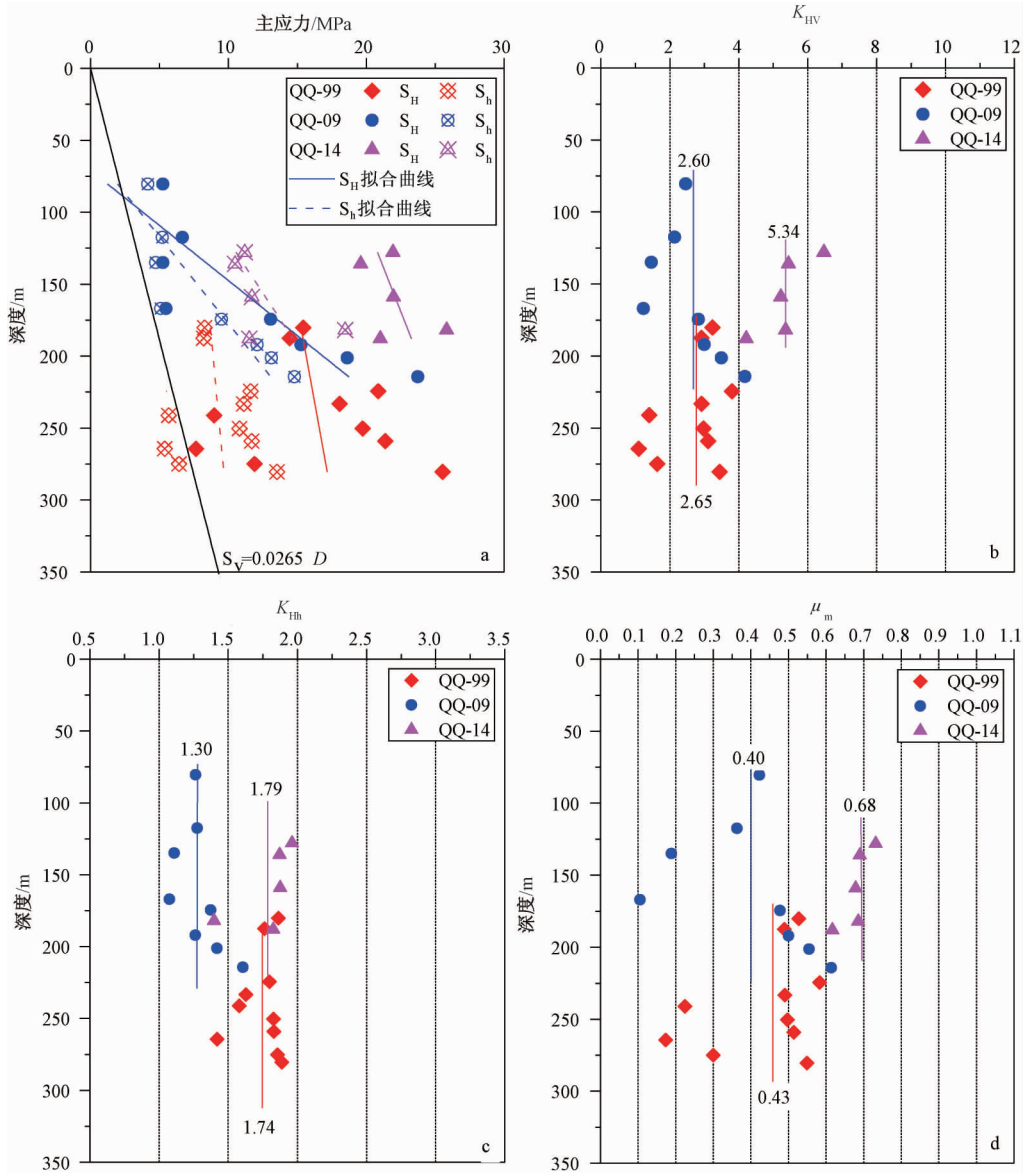
根据地应力数据 (见表 1), 分析了碛碛地区不同时间段主应力随深度分布特征, 结果见表 3, 并计算了特征参数 K_{HV} 、 K_{Hh} 和 μ_m 值 (见表 1)。碛碛地区汶川地震前至芦山地震后这一时间段内主应力及上述各特征参数随深度分布特征见图 4 所示。上述分布特征显示, 碛碛地区的最大 (S_H)、

最小 (S_h) 水平主应力随深度分布拟合方程中梯度系数 (见表 3) 随时间变化特征可以归纳为 $QQ-09 > QQ-14 > QQ-99$, 表明汶川地震后碛碛地区的地应力水平要高于芦山地震后的地应力水平, 并且两者还都高于汶川地震前地应力水平, 这反映龙门山断裂带西南段的碛碛地区在经历汶川地震和芦山地震两次大震后, 其长期以来积累的地应力依然未能彻底释放, 龙门山地区构造活动仍在西南段造成应变能积累; 碛碛地区的 K_{HV} 分布略显离散, 其平均值 (见图 4b) 随时间变化特征表现为, 汶川地震后的 K_{HV} 平均值略低于汶川地震前, 而芦山地震后 K_{HV} 平均值又显著增加, 并显著大于汶川地震前结果, 表明汶川地震前后水平向最大主应力作用强度变化很小或基本未变化, 而芦山地震后水平向最大主应力作用强度显著增加; 碛碛地区 K_{Hh} 变化特征表现为, 汶川地震后 K_{Hh} 值较地震前出现显著减小, 揭示汶川地震后碛碛地区的水平向差应力水平较震前降低, 而芦山地震后 K_{Hh} 略大于汶川地震前结果, 表明芦山地震后水平向差应力水平与汶川地震前水平大致相等或略大于后者; 碛碛地区 μ_m 的变化特征表现为, 汶川地震后其平均值与震前相比变化很小, 揭示汶川地震前后碛碛地区剪应力作用相对强度变化很小, 而芦山地震后 μ_m 平均值较汶川地震前后显著增加, 且接近断裂活动时的理论上限值 0.7^[7, 37], 表明芦山地震后该区域依然有较高的剪应力作用强度, 并已超过汶川地震前水平。

表3 硃碛地区主应力随深度变化拟合结果

Table 3 Fitting results of in-situ stress data versus depth in Qiaoqi region

钻孔	主应力随深度分布拟合结果		深度范围	地应力结构	S_H 平均方向
	S_H	S_h			
QQ-99	$S_H = 0.019D + 11.85$	$S_h = 0.01D + 6.49$	0 ~ 300 m	逆冲型	N47° E
QQ-09	$S_H = 0.131D - 9.26$	$S_h = 0.083D - 4.69$	0 ~ 250 m	逆冲型	N55° W
QQ-14	$S_H = 0.041D + 15.57$	$S_h = 0.069D + 1.77$	0 ~ 200 m	逆冲型	N59° W



a—主应力随深度分布特征; b— K_{HV} 分布特征; c— K_{Hh} 分布特征; d— μ_m 分布特征

图4 硃碛地区汶川—芦山地震前后主应力及特征参数随深度变化图

Fig. 4 Variation of principal stress and characteristic parameters with depth before and after the Wenchuan-lushan earthquake in Qiaoqi area

4.2 映秀地区地应力状态参数变化特征

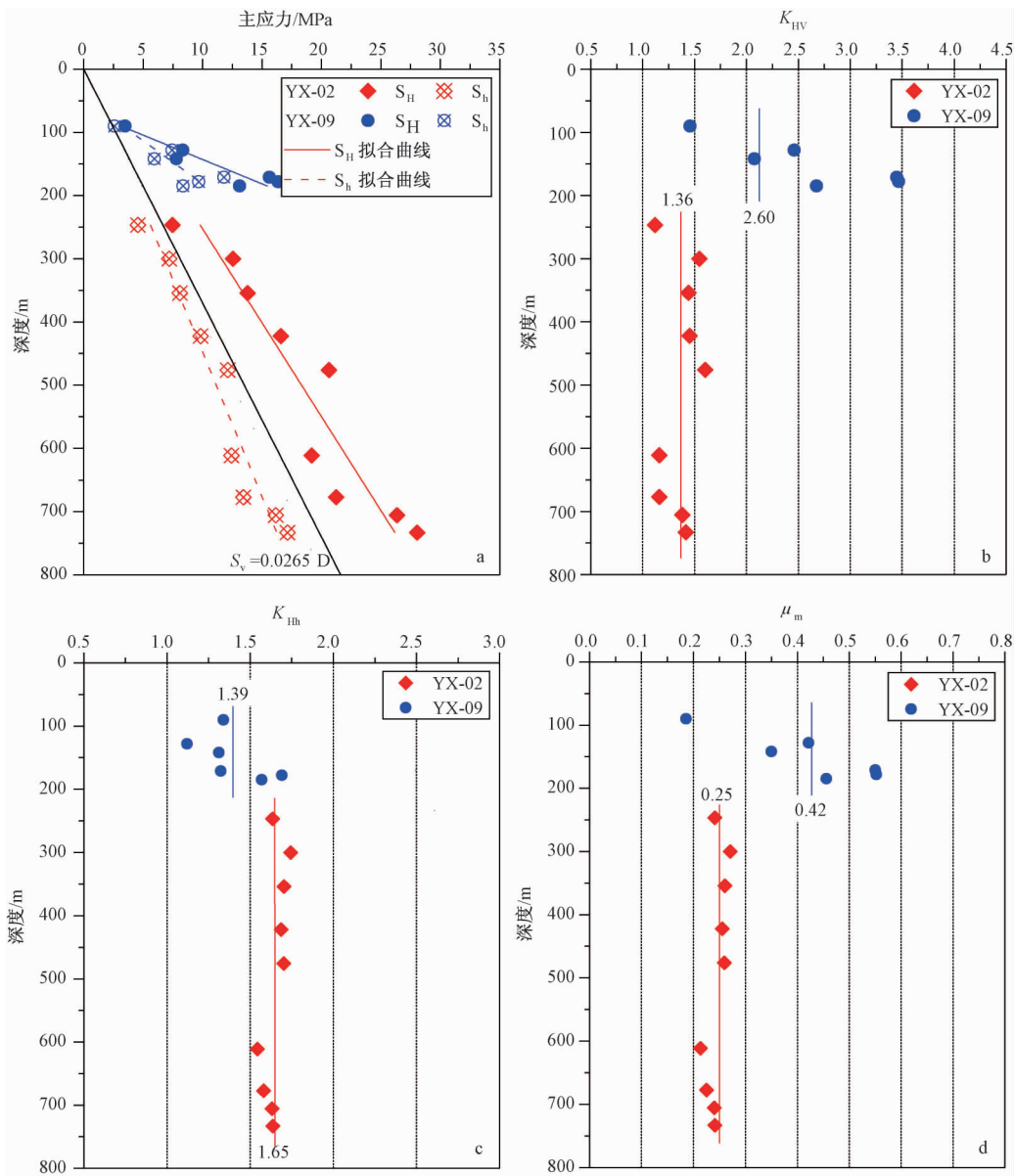
由于映秀地区无芦山地震后可对比的地应力数据, 研究其地应力状态变化时仅计算了汶川地震前后该地区实测主应力随深度变化情况 (见表

4) 及 K_{HV} 、 K_{Hh} 和 μ_m 值 (见表2), 各参数分布特征见图5。尽管如此, 由于映秀为汶川地震震中, 分析其实测地应力状态及其特征参数地震前后变化特征对于此次研究有重要的参考价值。

表 4 映秀地区主应力随深度变化拟合结果

Table 4 Fitting results of in-situ stress data versus depth in Yingxiu region

钻孔	主应力随深度分布拟合结果		深度范围	地应力结构	S_H 平均方向
	S_H	S_h			
YX-02	$S_H = 0.034D + 1.49$	$S_h = 0.022D + 0.23$	0 ~ 800 m	走滑型	N51°W
YX-09	$S_H = 0.130D - 8.54$	$S_h = 0.074D - 3.43$	0 ~ 200 m	逆冲型	N56°W



a—主应力随深度分布特征；b— K_{HV} 分布特征；c— K_{hh} 分布特征；d— μ_m 分布特征

图 5 映秀地区汶川地震前后主应力及特征参数随深度变化图

Fig. 5 Variation of principal stress and characteristic parameters with depth before and after the Wenchuan earthquake in Yingxiu area

映秀地区主应力及上述各特征参数随深度分布特征显示，映秀地区测点汶川地震后的 S_H 和 S_h 随深度分布拟合结果（方程）梯度系数要大于汶川地震前，表明映秀地区汶川地震后地应力水平依然高于地震前；映秀地区 YX-09 的 K_{HV} 分布略显

离散，但总体上讲汶川地震后 K_{HV} 要显著高于汶川地震前结果，表明汶川地震后映秀地区的水平向最大主应力作用强度出现了增加的趋势；映秀地区汶川地震后 K_{hh} 值明显低于地震前结果，表明汶川地震后映秀地区的水平向差应力水平较震前有

所降低;至于参数 μ_m ,上述结果显示映秀地区汶川地震后 μ_m 值高于地震前的 μ_m 值,并接近断裂活动时的理论下限值 $0.5^{[7,37]}$,表明该地区剪应力作用强度在地震后依然较强,但是需要说明的是汶川地震后 μ_m 分布也略显分散。

综合分析晓碛和映秀地区主应力随深度变化梯度系数、 K_{HV} 、 K_{HH} 和 μ_m 参数在汶川—芦山地震前后变化特征发现,在晓碛地区,梯度系数与 K_{HV} 、 K_{HH} 和 μ_m 参数在地震前后变化规律存在显著的差别:梯度系数表现为 $QQ-09 > QQ-14 > QQ-99$,而后三个参数均表现为 $QQ-14 > QQ-99 > QQ-09$,实际上,如果将表1中晓碛地区三个不同时间测量数据进行详细对比,发现大致相等深度上的地应力值在汶川—芦山地震事件前后的变化情况,与上述三个特征参数变化规律基本一致,也与其他方法对于晓碛地区乃至龙门山断裂带西南段现今构造应力场演化特征一致^[30],因此对于晓碛地区而言,特征参数 K_{HV} 、 K_{HH} 、 μ_m 更能准确表征地震事件前后地应力状态变化特征,反映区域地应力调整情况;对于映秀地区,除 K_{HH} 外,其它几个参数均表现为汶川地震后大于汶川地震前,与梯度系数地震前后变化特征一致,但是由于映秀地区地震前后的地应力数据分布深度范围差别过大,上述特征与认识尚需补充数据检验。

5 讨论

5.1 特征参数变化的精确性

前述主应力随深度变化梯度系数、 K_{HV} 、 K_{HH} 和 μ_m 等参数都是基于实测数据的统计计算结果,受到测试方法精度的影响,研究表明,各种地应力测量方法都有一定的精度范围,对于水压致裂法而言,其 S_h 的精度约为 $\pm 5\%$, S_H 的精度约为 $\pm 20\%^{[38]}$,通过计算其在地震事件前后变化量,进而分析地应力状态调整变化趋势,其精确性如何呢?所用实例研究结果表明,基于地应力实测数据获得的上述参数的变化规律,能够准确揭示大地震事件前后地应力状态变化,能够反映区域构造应力场长期调整变化趋势,尤其是参数 μ_m ,理论上讲 μ_m 值变化范围较小,但 μ_m 值在汶川和芦山地震事件前后变化特征,依然能准确的反映区域构造应力场在连续大震事件前后,以及长期调整演化趋势,这也与其它研究认识一致^[37]。由于

统计计算时的数据量、数据分布深度范围差别也会影响统计分析结果,地应力实测数据量越充足,不同时段数据分布深度范围差异性越小,对影响地应力测量结果的因素剥离越彻底^[33-34,39],应用上述特征参数变化分析构造应力场调整变化的可靠性会越高。

5.2 特征参数变化分析对地震预报研究的意义

地应力状态调整变化是地球内部构造活动的反映,理论上讲,地应力状态特征参数变化也能有效反映这个过程,如晓碛地区的地应力状态参数在汶川—芦山地震后变化特征表明,该地区的地应力并没有通过两次地震彻底释放,可能依然处于积累状态,汶川和芦山地震对该地区的地应力环境仅仅是部分调整作用,没有完全改变其地应力环境,已有研究成果也支持这一认识^[40-41]。但是与地下水^[42]、地应力相对变化数据^[43]、大震前中小震P轴方位角^[44]、地磁^[45]和跨断层监测数据^[46]等连续数据对地震有良好的响应和前兆特征不同,地应力测量数据是某一个时间点的值,尽管其对地震的指示作用已获得一定程度认可,但在目前研究程度下,无论是直接使用拜利定律和滑动摩擦准则分析地应力数据^[11-12,47],还是分析其特征参数变化特征,都只是地震预报研究中基于有限的实测地应力数据而进行的半定量评价分析,还需要配合岩石力学和数值模拟等方法,以及地形变、重力、地磁和地电等其它地球物理参数进行深入研究。可以确定的是基于地应力测量数据及其包含的地球动力学信息开展地震预报研究是值得深入研究的,尤其是长期的、可对比的地应力测量数据及其特征参数变化分析对地震预报研究有所突破有重要意义。

6 结论

以龙门山断裂带西南段的晓碛和映秀地区为例,利用汶川至芦山地震前后获得的地应力数据,计算了表征地应力状态的特征参数在地震事件前后变化情况,进而研究了地应力状态在地震前后变化特征,探讨了其对于地震预报研究的意义,获得的主要认识和结论有:(1)晓碛地区地应力状态特征参数 K_{HV} 、 K_{HH} 和 μ_m 变化特征能准确的反映汶川地震和芦山地震前后区域构造应力场调整变化特征,而仅用主应力随深度变化梯度系数不

能完全准确地反映地震事件前后构造应力场调整变化情况；(2) 映秀地区受地震前后的地应力数据分布深度范围差异等的影响，其主应力梯度系数与特征参数 K_{HV} 、 K_{Hh} 和 μ_m 的变化特征存在显著差异，对其反映的应力场调整变化特征需要补充更多数据检验；(3) 郫碛和映秀地区的地应力状态特征参数 K_{HV} 、 K_{Hh} 和 μ_m 在汶川地震和芦山地震前后变化特征表明，其变化特征受地应力数据量、数据精度以及分布特征等的影响，应用其变化特征分析区域地应力场在地震事件前后调整变化时，需要长期可对比的、准确的地应力实测数据；(4) 通过实例研究认为，利用地应力状态特征参数及其对地震事件响应来进行地震预报研究是值得深入开展工作的，长期的、可对比的高质量地应力数据是上述研究有所突破的关键。

参考文献/References

- [1] Harris R A. Introduction to special section: stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (B10): 24347 ~ 24358.
- [2] Stein R S. The role of stress transfer in earthquake occurrence [J]. *Nature*, 1999, 402 (6762): 605 ~ 609.
- [3] Scholz C H. *The mechanics of earthquakes and faulting* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [4] Steacy S, Gombert J, Cocco M. Introduction to special section: stress transfer, earthquake triggering, and time-dependent seismic hazard [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110 (B5): B005S01, doi: 10.1029/2005JB003692.
- [5] 石耀霖, 张贝, 张斯奇, 等. 地震数值预报 [J]. *物理*, 2013, 42 (4): 237 ~ 255.
SHI Yaolin, ZHANG Bei, ZHANG Siqi, et al. Numerical earthquake prediction [J]. *Physics*, 2013, 42 (4): 237 ~ 255. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李方全, 孙世宗, 李立球. 华北及郟庐断裂带地应力测量 [J]. *岩石力学与工程学报*, 1982, 1 (1): 73 ~ 86.
LI Fangquan, SUN Shizong, LI Liqiu. In-situ stress measurements in North China and Tancheng-Lujiang fault zone [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1982, 1 (1): 73 ~ 86. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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発生の予測 [J]. *地震*, 1998, 50 (2): 201 ~ 208. (in Japanese)
- [8] Liao C T, Zhang C S, Wu M L, et al. Stress change near the Kunlun fault before and after the M_s 8.1 Kunlun earthquake [J]. *Geophysical Research Letter*, 2003, 30 (20): 2027.
- [9] Yamashita F, Fukuyama E, Omura K. Estimation of fault strength: reconstruction of stress before the 1995 Kobe Earthquake [J]. *Science*, 2004, 306 (5694): 261 ~ 263.
- [10] 郭啟良, 王成虎, 马洪生, 等. 汶川 M_s 8.0 级大震前后的水压致裂原地应力测量 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (5): 1395 ~ 1401.
GUO Qiliang, WANG Chenghu, MA Hongsheng, et al. In-situ hydro-fracture stress measurement before and after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake of China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52 (5): 1395 ~ 1401. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (4): 746 ~ 753.
- [12] 秦向辉, 陈群策, 谭成轩, 等. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32 (S1): 2870 ~ 2876.
QIN Xianghui, CHEN Qunce, TAN Chengxuan, et al. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32 (S1): 2870 ~ 2876. (in Chinese with English abstract)
- [13] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 汶川 M_s 8.0 地震对龙门山断裂带附近地应力环境影响初探——以北川、江油地区为例 [J]. *地震学报*, 2013, 35 (2): 137 ~ 150.
FENG Chengjun, CHEN Qunce, TAN Chengxuan, et al. 2013. A preliminary study of the influence of Wenchuan M_s 8.0 earthquake on in-situ stress state near Longmenshan fault zone: a case study in Beichuan and Jiangyou areas [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35 (2): 137 ~ 150. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 [J]. *地球物理学报*, 2012, 55 (12): 3623 ~ 3632.
CHEN Qunce, FENG Chengjun, MENG Wen, et al. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55 (12): 3923 ~ 3932. (in Chinese with English abstract)
- [15] 孟文, 陈群策, 吴满路, 等. 龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28 (3): 1150 ~ 1160.
MENG Wen, CHEN Qunce, WU Manlu, et al. Research on segmentation and characteristic of Tectonic stress field of Longmenshan Fault Zone [J]. *Progress in Geophysics*, 2012, 28 (3): 1150 ~ 1160. (in Chinese with English abstract)
- [16] Meng W, Chen Q C, Zhao Z, et al. Characteristics and implications of the stress state in the Longmen Shan fault zone, eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Tectonophysics*, 2015, 656: 1 ~ 19.
- [17] Wang C H, Song C K, Guo Q L, et al. New insights into stress changes before and after the Wenchuan Earthquake using hydraulic fracturing measurements [J]. *Engineering Geology*,

- 2015, 194: 98 ~ 113.
- [18] Qin X H, Chen Q C, Wu M L, et al. In-situ stress measurements along the Beichuan-Yingxiu fault after the Wenchuan Earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2015, 194: 114 ~ 122.
- [19] Wu M L, Zhang C Y, Fan T Y. Stress state of the Baoxing segment of the southwestern Longmenshan Fault Zone before and after the M_s 7.0 Lushan earthquake [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 121: 9 ~ 19.
- [20] 邓起东, 张培震, 冉勇, 等. 中国活动构造基本特征 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 2002, 32 (12): 1020 ~ 1030.
DENG Qidong, ZHANG Peizhen, RAN Yongkang, et al. Basic characteristics of active tectonics of China [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2003, 46 (4): 356 ~ 372.
- [21] Xu Z Q, Ji S C, Li H B, et al. Uplift of the Longmen Shan Range and the Wenchuan earthquake [J]. *Episodes*, 2008, 31 (3): 291 ~ 301
- [22] Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan plateau, and the 2008 Wenchuan ($M = 7.9$) earthquake [J]. *Nature*, 2009, 458 (7235): 194 ~ 197.
- [23] 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 [J]. *地震地质*, 1994, 16 (4): 389 ~ 403.
DENG Qidong, CHEN Shefa, ZHAO Xiaolin. Tectonics, scismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions [J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16 (4): 389 ~ 403. (in Chinese with English abstract)
- [24] Burchfiel B C, Chen Z L, Liu Y, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China [J]. *International Geology Review*, 1995, 37 (8): 661 ~ 735.
- [25] 李勇, 周荣军, DENSMORE A L, 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志 [J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (1): 40 ~ 51.
LI Yong, ZHOU Rongjun, DENSMORE A L, et al. Geomorphic evidence for the Late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen Mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (1): 40 ~ 51. (in Chinese with English abstract)
- [26] Zhou R J, Li Y, Densmore A L, et al. Active tectonics of the Longmen Shan region on the eastern margin of the Tibetan plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81 (4): 593 ~ 604.
- [27] 李海兵, 付小方, VAN DER WORD J, 等. 汶川地震 (M_s 8.0) 地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用 [J]. *地质学报*, 2008, 82 (12): 1623 ~ 1643.
LI Haibin, FU Xiaofang, VAN DER WORD J, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2008, 82 (12): 1623 ~ 1643. (in Chinese with English abstract)
- [28] Li H B, Wang H, Xu Z Q, et al. Characteristics of the fault-related rocks, fault zones and the principal slip zone in the Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole - 1 (WSFD - 1) [J]. *Tectonophysics*, 2013, 584: 23 ~ 42.
- [29] 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等. 汶川 M_s 8.0 地震后龙门山断裂带地应力状态研究 [J]. *地球物理学进展*, 2013, 28 (3): 1122 ~ 1130.
WU Manlu, ZHANG Yueqiao, LIAO Chunting, et al. Research on the stress state along the Longmenshan fault belt after the Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28 (3): 1122 ~ 1130. (in Chinese with English abstract)
- [30] Liu Y W, Chen T, Xie F R, et al. Analysis of fluid induced aftershocks following the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. *Tectonophysics*, 2014, 619 ~ 620: 149 ~ 158.
- [31] Zoback M D, Tsukahara H, Hickman S. Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: implications for the magnitude of shear stress at depth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85 (B11): 6157 ~ 6173.
- [32] Tan C X, Wang R J, Sun Y, et al. Numerical modelling estimation of the 'tectonic stress plane' (TSP) beneath topography with quasi-U-shaped valleys [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41 (2): 303 ~ 310.
- [33] de Vallejo L I G, Hijazo T. A new method of estimating the ratio between in situ rock stresses and tectonics based on empirical and probabilistic analyses [J]. *Engineering Geology*, 2008, 101 (3 ~ 4): 185 ~ 194.
- [34] Stephansson O, Zang A. ISRM suggested methods for rock stress estimation-part 5: establishing a model for the in situ stress at a given site [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45 (6): 955 ~ 969.
- [35] Lu R Q, He D F, John S, et al. Structural model of the central Longmen Shan thrusts using seismic reflection profiles: implications for the sediments and deformations since the Mesozoic [J]. *Tectonophysics*, 2014, 630: 43 ~ 53.
- [36] Brown E T, Hoek E. Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15 (4): 211 ~ 215.
- [37] 王成虎, 宋成科, 郭启良, 等. 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 [J]. *地球物理学报*, 2014, 57 (1): 102 ~ 114.
WANG Chenghu, SONG Chengke, GUO Qiliang, et al. Stress build-up in the shallow crust before the Lushan earthquake based on the in-situ stress measurements [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57 (1): 102 ~ 114. (in Chinese with English abstract)
- [38] Ljunggren C, Chang Y T, Janson T, et al. An overview of rock stress measurement methods [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003, 40 (7 ~ 8): 975 ~ 989.
- [39] Haimson B C. The effect of lithology, inhomogeneity, topography, and faults, on in situ stress measurements by hydraulic fracturing, and the importance of correct data

- interpretation and independent evidence in support of results [A]. Proceedings of 2010 International Symposium on In-Situ Rock Stress [C]. Beijing, China: International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010.
- [40] 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 浅谈芦山地震 [J]. 地震学报, 2013, 35 (3): 285 ~ 295.
CHEN Yuntai, YANG Zhixian, ZHANG Yong, et al. A brief talk on the 20 April 2013 Lushan M_w 6.7 earthquake [J]. Acta Seismologica Sinica, 2013, 35 (3): 285 ~ 295. (in Chinese with English abstract)
- [41] 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 2013年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与2008年汶川地震的关系 [J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43 (6): 1002 ~ 1009.
SHAN Bin, XIONG Xiong, ZHENG Yong, et al. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake [J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56 (7): 1169 ~ 1176.
- [42] 谭成轩, 张鹏, 丰成君, 等. 探索首都圈地区深孔地应力测量与实时监测及其在震害地质研究中应用 [J]. 地质学报, 2014, 88 (8): 1436 ~ 1452.
TAN Chengxuan, ZHANG Peng, FENG Chengjun, et al. An approach to deep borehole crustal stress measuring and real-time monitoring and its application in seismogeology research in Capital Beijing region [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (8): 1436 ~ 1452. (in Chinese with English abstract)
- [43] Zhang C Y, Wu M L, Chen Q C, et al. Piezomagnetic in-situ stress monitoring and its application in the Longmenshan fault zone [J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88 (5): 1592 ~ 1602.
- [44] 郭祥云, 陈学忠, 李艳娥, 等. 四川芦山7.0级地震前中小地震P轴方位角 C_V 值的变化 [J]. 地震工程学报, 2016, 38 (2): 242 ~ 248.
GUO Xiangyun, CHEN Xuezhong, LI Yan'e, et al. C_V value variation of P-axis azimuth for small to moderate earthquakes before the Lushan M_s 7.0 earthquake in Sichuan [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38 (2): 242 ~ 248. (in Chinese with English abstract)
- [45] 李秋红, 李英, 陈双贵. 汶川地震 (M_s 8.0) 前的地磁低频峰值变化 [J]. 地震工程学报, 2016, 38 (4): 606 ~ 608.
LI Qiuhong, LI Ying, CHEN Shuanggui. Peak value change of power spectrum at low frequency before Wenchuan M_s 8.0 earthquake [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2016, 38 (4): 606 ~ 608. (in Chinese with English abstract)
- [46] 王宁, 王生文, 吕健, 等. 四川地区地震前跨断层数据异常分析 [J]. 地震工程学报, 2017, 39 (2): 294 ~ 300.
WANG Ning, WANG Shengwen, LV Jian, et al. Pre-earthquake anomaly analysis of cross-fault data in Sichuan [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39 (2): 294 ~ 300. (in Chinese with English abstract)
- [47] Zoback M D, Townend J. Implications of hydrostatic pore pressures and high crustal strength for the deformation of intraplate lithosphere [J]. Tectonophysics, 2001, 336 (1/4): 19 ~ 30.