

doi: 10.12029/gc20160529

戚帮申, 张鹏, 丰成君, 等. 川甘陕交汇地区现今地应力环境与地震危险性[J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1814–1827.

Qi Bangshen, Zhang Peng, Feng Chengjun, et al. Current in-situ stress state and seismic risk in Sichuan–Gansu–Shaanxi border area[J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1814–1827(in Chinese with English abstract).

川甘陕交汇地区现今地应力环境与地震危险性

戚帮申^{1,2} 张鹏^{1,2} 丰成君^{1,2} 辛鹏^{1,2} 孟静^{1,2}
谭成轩^{1,2} 吴树仁^{1,2} 杨肖肖³ 陈群策^{1,2} 胡道功^{1,2}

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 国土资源部新构造与地质灾害重点实验室, 北京 100081;
3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要:川甘陕交汇地区新构造活动强烈、地震频发, 具有复杂多样的构造变形模式和构造强烈活动特征, 为一潜在地震危险性研究的关键构造部位。为了查明川甘陕交汇关键构造部位地壳浅表层现今地应力环境和潜在地震危险性, 在甘肃省水市甘谷县及四川省广元市三堆镇实施机械岩心钻探工程和水压致裂地应力测量。地应力测量结果表明, 甘谷钻孔 3 个主应力关系为 $S_H > S_h > S_v$, 甘谷地区现今水平主应力起主导作用, 且具有较高地应力值, 钻孔附近最大水平主压应力方位平均为 $N41^\circ E$, 易于钻孔附近北西向西秦岭北缘断裂产生左旋走滑兼逆冲活动; 三堆钻孔 3 个主应力关系为 $S_H > S_h > S_v$, 该地区现今水平主应力起主导作用, 钻孔附近最大水平主压应力方位平均为 $N85^\circ W$, 利于钻孔附近北东向青川断裂产生右旋走滑兼逆冲活动。利用库仑摩擦滑动准则对断裂活动进行分析, 结果表明天水和广元地区的地应力大小均已经达到了使地壳浅部断层产生滑动失稳的临界条件, 需加强地应力实时监测和分析。该研究成果为川甘陕交汇关键构造部位的断裂活动性分析和地质环境安全评价提供科学依据。

关键词:川甘陕交汇地区; 西秦岭北缘断裂; 青川断裂; 水压致裂地应力测量; 地震危险性
中图分类号: P511; P542 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016)05-1814-14

Current in-situ stress state and seismic risk in Sichuan–Gansu–Shaanxi border area

QI Bang-shen^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, FENG Cheng-jun^{1,2}, XIN Peng^{1,2}, MENG Jing^{1,2},
TAN Cheng-xuan^{1,2}, WU Shu-ren^{1,2}, YANG Xiao-xiao³, CHEN Qun-ce^{1,2}, HU Dao-gong^{1,2}

(1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China*; 2. *Key Laboratory of Neotectonic Movement & Geohazard, Ministry of Land and Resources, Beijing 100081, China*; 3. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

Abstract: The Sichuan–Gansu–Shaanxi border area has experienced many great earthquakes with complicated tectonic deformation and tectonic activities, which is the reason why this area is important for study of seismic risk. In order to better understand in-situ

收稿日期: 2015-08-03; 改回日期: 2015-11-04

基金项目: 中国地质调查局工作项目“关中天水经济区主要断裂活动性及地质灾害效应调查”(1212011220088)资助。

作者简介: 戚帮申, 男, 1988年生, 博士生, 地质工程, 主要从事区域地壳稳定性评价、工程地质和地质灾害研究; E-mail: qibangshen@126.com。

通讯作者: 丰成君, 男, 1985年生, 助理研究员, 博士, 地质工程, 从事构造应力场研究; E-mail: feng2010618@aliyun.com。

stress environment of Tianshui area and to evaluate the seismic risk, it is necessary to conduct deep borehole in-situ stress measurement. In this study, data were gathered from 9 in-situ stress sensors installed in deep borehole (600 m) in the southwest of Gangu County, Gansu Province and 14 in-situ stress sensors installed in deep borehole (400.12 m) at Sandui Town, Sichuan Province. The in-situ stress data reveal that the geostress level of the region is relatively high and both horizontal principal stresses in two tests are larger than the vertical stress ($S_H > S_h > S_v$). The direction of the current maximum horizontal principal stress is N41°E in Gangu borehole and is N85°W in Sandui borehole. The directions of the current maximum horizontal principal stress reflect that the present activity property of the north margin of west Qinling fault is thrust and sinistral slip, and that the present activity property of the Qingchuan fault is thrust and dextral slip. The activity of the north margin of west Qinling fault and the Qingchuan fault was analyzed by Coulomb friction sliding criterion, and the results reveal that the current in-situ stress levels have reached the critical condition of sliding instability. Based on the in-situ stress state and earthquake migration data, it is suggested that more attention should be paid to the Sichuan-Gansu-Shaanxi border area. The results obtained by the authors have great significance for analysis of active faults, long-term monitoring of in-situ stresses, assessment of the regional geological environment and geological disasters prevention.

Key words: Sichuan-Gansu-Shaanxi border area; north margin of west Qinling fault; Qingchuan fault; hydraulic fracturing stress measurement; seismic risk

About the first author: QI Bang-shen, male, born in 1988, doctor candidate, majors in geological engineering; E-mail: qibangshen@126.com.

About the corresponding author: FENG Cheng-jun, male, born in 1985, assistant researcher, mainly engages in the study of tectonic stress field; E-mail: feng2010618@aliyun.com.

Fund support: Supported by China Geological Survey Program (No. 1212011220088).

地应力是导致地震发生的重要影响因素之一,大地震的孕育和发生是在特定构造部位地应力长期积累、集中、加强和最终导致应变能突然释放的过程^[1-2]。通过关键构造部位地应力测量与实时监测有助于揭示其现今地应力环境和主要断裂现今活动特征,从而对地震地质研究、断裂活动性及其灾害效应分析和工程建设等具有十分重要的意义^[2-13]。

自2001年以来沿巴颜喀拉地块周边主要活动断裂发生了一系列强震,其中2008年5月12日14时28分在四川省西部汶川发生了震惊世界的汶川Ms 8.0地震,震中位于青藏高原东缘的龙门山断裂带,造成巨大的人员伤亡和财产损失。这次地震形成了约275 km长的地表破裂带^[14-15],并沿北东方向形成了长达近330 km的余震带^[15-16]。汶川地震之后,相关学者高度关注未来强震可能会沿我国南北地震带分别向南、北方向发展^[17],为此沿龙门山断裂构造带开展了大量的现今地应力测量与实时监测及现今构造应力场研究工作,取得很多研究成果^[2,7-8,12,16,18],并对高地应力水平的龙门山断裂带西南段作为潜在强震区给予了很高的关注^[8,16,19]。到目前为止,已初步表明沿南北地震带强震有分别向南和北迁移的趋势,如2013年4月20日在龙门山断裂带西南段四川雅安

芦山县发生了Ms 7.0地震,2014年8月3日在云南昭通鲁甸县发生了Ms 6.5地震,2013年7月22日在甘肃省定西县发生了Ms 6.6地震。川甘陕交汇地区位于中国南北地震构造带北段^[17],是中国南北地震构造带历史强震频发地区,并且该地区作为未来潜在强震趋势的关键构造部位,其潜在强震趋势一直是学者们高度关注的区域之一^[20-27]。然而该地区的现今地应力状态尚不明确,开展该地区的现今地应力测量和实时监测,对断裂活动性及其未来强地震发生的认识具有极其重要意义。通过在甘肃省水市甘谷县及四川省广元市三堆镇实施机械岩心钻探工程和水压致裂地应力测量,揭示川甘陕交汇地区地壳浅表层的现今地应力环境,并通过库仑摩擦滑动准则探讨该关键构造部位的地震危险性。

1 区域构造地质背景与主要活动断裂

川甘陕交汇地区处于阿拉善地块、祁连地块、柴达木地块和鄂尔多斯地块交界地带(图1-a),具有构造复杂和全新世以来断裂活动强烈的特点^[28],是著名的南北地震带及青藏高原东北缘的重要组成部分,其复杂多样的构造变形模式和构造活动特征是该地区中强地震孕育和发生的重要原因。海

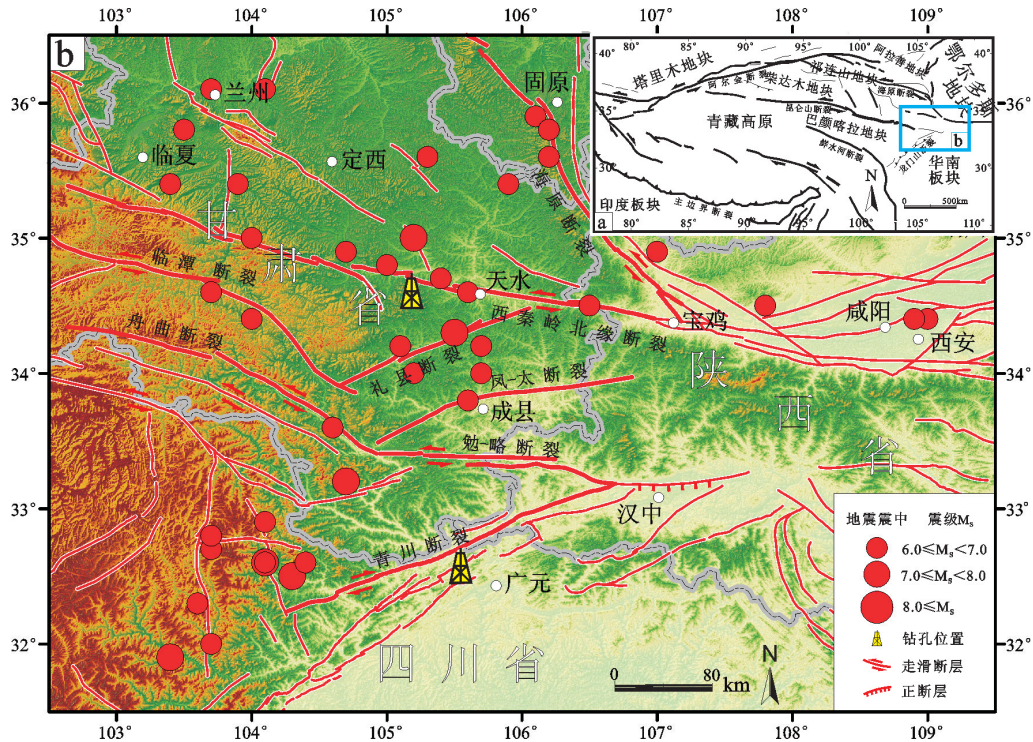


图1 川甘陕地区地应力测量与实时监测钻孔位置

a—研究区及其邻区构造纲要图; b—研究区地形地貌、主要活动构造分布特征以及钻孔位置

Fig.1 Location of borehole in-situ stress measurement and real time supervision site in Sichuan-Gansu-Shaanxi border area and simplified geological map

a-Sketch map of major blocks of study area and adjacent areas; b-Landform and active tectonic characteristics of the study area and location of boreholes for in-situ stress measurement

原断裂带、西秦岭北缘断裂带和龙门山断裂带在甘肃省东南部和四川省北部呈喇叭状构造格局分布,受古近纪以来印度板块向欧亚板块的俯冲和挤压作用影响^[29-31],整个高原产生的近南北向挤压应力^[32-33],并在青藏高原北部出现块体向东“挤出”的趋势^[32],GPS观测资料同样显示该地区具有向东运动的特征^[21,24],并受到鄂尔多斯地块和华南地块的阻挡,从而使川甘陕交汇地区成为青藏高原东北部地壳浅部块体物质往东运移的大闸口^[34],形成特殊的“地貌犄角”^[20],导致川甘陕地区构造应力较易集中,这也是该地区中强地震的主要孕震环境和动力机制。

西秦岭北缘断裂带作为甘肃东南部重要的块体边界之一,也是青藏高原东北部一条重要的北西向构造带,是天水地区中强地震频发的一个重要诱发因素^[35]。西秦岭北缘断裂位于西秦岭山的北部前缘,东起陕西省宝鸡,向西经甘肃省天水、甘谷、武山、漳县和临夏,西至青海省同仁一带,构成了陇

西盆地、临夏盆地、循化和化隆盆地的南边界,全长约420 km(图1-b)。新生代以来,由于受喜马拉雅运动的影响,该断裂带总体具有左旋走滑的活动特征。西秦岭北缘断裂带从东到西由宝鸡段、天水段、武山段、漳县段、黄香沟段和锅麻滩段呈左接斜列组成^[36]。其中天水段和武山段位于天水地区,对该地区的现今地应力状态有一定的影响。天水段东起渭河谷地,经天水市北的牛家山,过吊沟门,西至甘谷东南,长约50 km,走向290°,倾向NE或SW,倾角50°~70°^[36]。新生代以来断裂控制了新近系发育,晚第四纪尤其是全新世期间仍在活动,活动特征表现为左旋走滑,走滑速率约为2.8 mm/a^[37]。据历史地震考证结果,该断裂为734年天水7级地震的主要发震断裂^[38];武山段东起凤凰山南麓的胡家沟,经武家河、洛门、武山止于鸳鸯镇西,长约75 km,走向280°~290°,倾向NE,倾角为60°~70°^[36]。断裂活动明显断错山脊、冲沟和河流阶地,具有左旋走滑兼具少量逆冲活动特征,全新世水平滑动速

率约为 $2.8 \text{ mm/a}^{[37]}$ 。根据历史地震资料核查和现场调查结果,该断裂可能曾发生公元前47年陇西6级地震、128年甘谷6级地震和1765年甘谷—武山6级地震^[39]。

青川断裂作为龙门山断裂的北段,与映秀—北川断裂成左阶排列,断裂西起平武,向东经青川至勉县,呈北东东向展布,长约250 km(图1-b)。青川断裂具有多期活动的特点,中生代表现为中—深部构造层次的韧性剪切变形,而新生代期间主要表现为浅层次脆性变形的叠加,形成以碎裂岩为代表的构造岩^[40],并具有明显的右行走滑特征^[41]。青川断裂由2个分支断裂组成,即平武—青川—勉县断裂和八海—玉泉坝断裂。前者是后山断裂的主干,后者位于主干断裂之北,规模较小,在阳平关附近交汇到主干断裂上^[42]。该地区受5.12汶川地震的余震影响严重,多次发生5级以上的余震,单5月27日一天曾连续发生9次余震,其中青木川镇发生5.7级余震,青川发生5.4级余震。因此,青川断裂带存在很强的大震危险性。

2 川甘陕交汇地区水压致裂地应力测量方法及结果

为了揭示川甘陕交汇部位天水地区现今地应力环境,通过野外活动断裂、岩体特征和地形地貌等详细调查,在甘肃省天水市甘谷县(34.5817°N , 105.1847°E , $H=2100 \text{ m}$)燕山期花岗岩体中和四川省广元市三堆镇(32.5613°N , 105.5492°E , $H=727 \text{ m}$)侏罗系长石石英砂岩和泥岩中实施机械岩心钻探工程施工及地应力测量(图1)。甘谷钻孔(GG-1)处于西秦岭北缘断裂带的西南盘,钻孔孔深600 m,静水位到孔口0 m;三堆钻孔(SD-1)处于青川断裂的东南盘,钻孔孔深400.12 m,静水位到孔口149.40 m。

地应力测量采用国际岩石力学学会推荐的水压致裂地应力测量方法^[43],由于该方法具有操作简单、在无需岩石力学参数情况下可以直接测得应力值、可直接确定最小主应力以及测量深度在理论上不受限制等优点,逐渐在水电、矿山、隧道等工程领域以及大陆动力学研究、区域地壳稳定性评价、地震预报等研究领域得到了广泛应用^[2-8,12-13,16]。实验过程:首先利用一对可膨胀的封隔器在选定的测量

深度封隔一段钻孔,利用钻杆作为单回路供水通道,通过安装在封隔器上部的多功能推拉开关,按照测试程序,分别向封隔器和压裂段压入高压流体以实现作封和压裂。同时利用X-Y记录仪、计算机数字采集系统或数字磁带记录仪记录压力随时间的变化(图2-a)。然后对实测记录曲线进行分析,得到特征压力参数,根据相应的理论计算公式,得到测点处的最大和最小水平主应力的量值以及岩石的水压致裂抗张强度等岩石力学参数。

在压裂试验结束后可进行水压裂缝方位测定的定向印模试验,以确定最大水平主压应力的方向。该试验方法为它由自动定向仪和印模器组成,印模器从外观上看,与封隔器大致相同,所不同的是它的表层覆盖着一层半硫化橡胶,用以增强其塑性,从而使使得破裂的印痕得以清晰的记录并保持较长的时间。在测定方位时,先将接有定向仪的印模器放到水压致裂应力测量段的深度,然后在地面通过增压系统将印模器膨胀(图2-b)。施加足够的高压以获得清晰的裂缝痕迹,促使孔壁已有裂缝重新张开以便半硫化橡胶挤入,印模器表面就印制与裂缝相对应的凸起印迹,最后依据电磁罗盘确定的基线方位值和印痕与基线之间的关系即可算出破裂面的方位,该方位值就是最大水平主压应力的方向。

根据钻探岩心的岩石质量指标以及岩石的力学性质选取测试段进行水压致裂地应力测量,为了提高各压力参数的取值精度以及相关数据的可比性,采用国际岩石力学学会推荐的五种方法之一的 dt/dp 法进行测量数据的处理^[8,13,44-45]。根据各试验段的压裂曲线,取值压裂特征参数 P_s 、 P_b 和 P_r ,其中 P_s 为水压裂缝开始闭合的关闭压力, P_b 为水压致裂产生裂缝的破裂压力, P_r 为水力压裂使水压裂缝重新张开的重张压力,单位均为MPa; P_0 为水压致裂段深度的孔隙压力,单位MPa; ρ 为岩石密度,一般取 $\rho=2.60 \times 10^3 \sim 2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度,单位 m/s^2 ; h 为钻孔岩层深度,单位m;根据相应的理论计算公式(1)、(2)、(3)和(4),获得地应力测量结果。

$$S_{\text{H}}=P_s \quad (1)$$

$$S_{\text{H}}=3P_s-P_r-P_0 \quad (2)$$

$$S_v=\rho gh \quad (3)$$

$$T=P_b-P_r \quad (4)$$

水压致裂地应力测量压裂曲线见图3,最大水

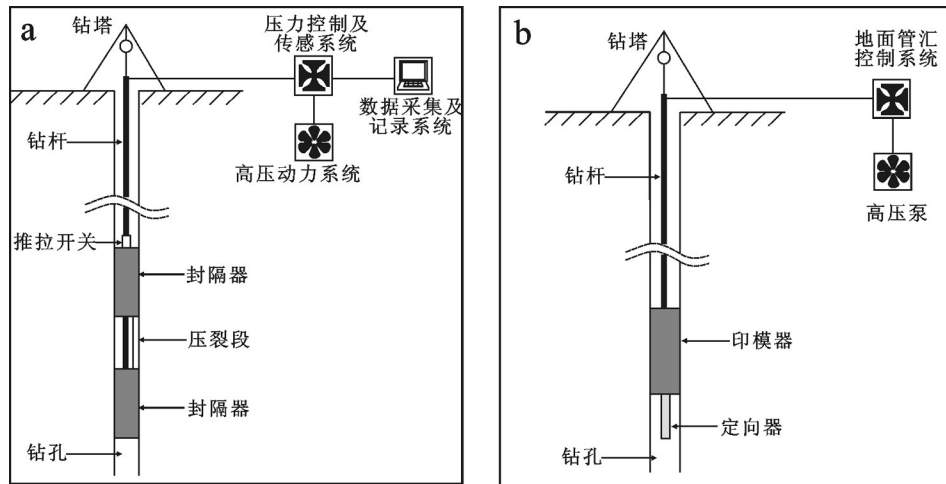


图2 水压致裂地应力测量系统示意图

a—水压致裂地应力测量实验示意图; b—印模测试系统示意图

Fig.2 In-situ stress measurement system of hydraulic fracturing

a—Schematic diagram of in-situ stress measurement; b—Schematic diagram of impressions and orientations of hydraulic fractures measurement

平主压应力定向印痕展开柱面图见图4,具体地应力测试结果见表1。

3 川甘陕交汇地区水压致裂地应力测量结果分析

3.1 天水甘谷县钻孔水压致裂地应力测量结果分析

水平主应力 S_H 和 S_h 总体上随深度的增加而增大,最大水平主应力值随深度增加的梯度为0.0511 MPa/m,最小水平主应力值随深度增加的线性梯度为0.0334 MPa/m(图5-a),其线性回归方程为:

$$S_H=0.0511H+8.31, R^2=0.5983 \quad (5)$$

$$S_h=0.0334H+4.36, R^2=0.6812 \quad (6)$$

$$S_v=0.0265H \quad (7)$$

式中, H 为钻孔深度, R^2 为回归方程相关系数。

受岩体非均质性、节理非常发育以及钻孔周围地形的影响, S_H 和 S_h 的大小随深度的线性回归相关系数不高,并且最大和最小水平主应力在193~294 m深度范围内出现水平主压力应力集中的现象(图5-a)。Tan et al. 通过大量三维应力场有限元数值模拟分析讨论了地形地貌对应力的影响,提出“构造应力面”的概念,即由三维空间不同地点非构造应力影响消失的深度点构成的曲面,在构造应力面之上,非构造应力和构造应力同时存在,而在构造应力面之下,仅构造应力存在^[46]。同时研究结果显示,沟谷宽度影响非构造应力集中范围大小和形状,而不影响

构造应力面的深度;山体高度(或山体坡度)不仅影响非构造应力集中范围大小和形状,还影响构造应力面的深度;当山体坡度小于40°时,重力作用不会在沟谷或坡角引起非构造应力集中,但当山体坡度大于40°时,重力作用会在沟谷或坡角引起一定程度的非构造应力集中,但应力集中强度较弱;水平侧压力和山体高度是影响构造应力面深度的主要因素,当水平侧压力随深度变化梯度与重力梯度相等时,在沟谷谷底构造应力面深度近似等于山体高度,当水平侧压力随深度变化梯度增大,构造应力面深度与其呈线性增加,同时在沟谷或坡角非构造应力集中强度加强^[9,46]。甘谷钻孔位于山体坡度在40°~45°的“U”型谷谷底(图5-a),受此影响导致一定程度的非构造应力集中,从而导致最大和最小水平主应力在193~294 m深度范围内出现“应力包”现象(图5-a)。

地应力测量结果显示在149.30~475.19 m深度内,最大水平主应力为7.15~35.96 MPa,最小水平主应力为4.81~22.79 MPa,垂向应力为3.96~12.59 MPa,考虑钻孔岩体在完整性较差的情况下,水平主应力仍高于同等深度和同等岩性条件下的水平主应力大小,因此该钻孔附近现今属于高地应力环境^[20,27]。

三个主应力之间的关系均为 $S_H>S_h>S_v$,表明该地区水平应力占主导地位。由于钻孔所在花岗岩

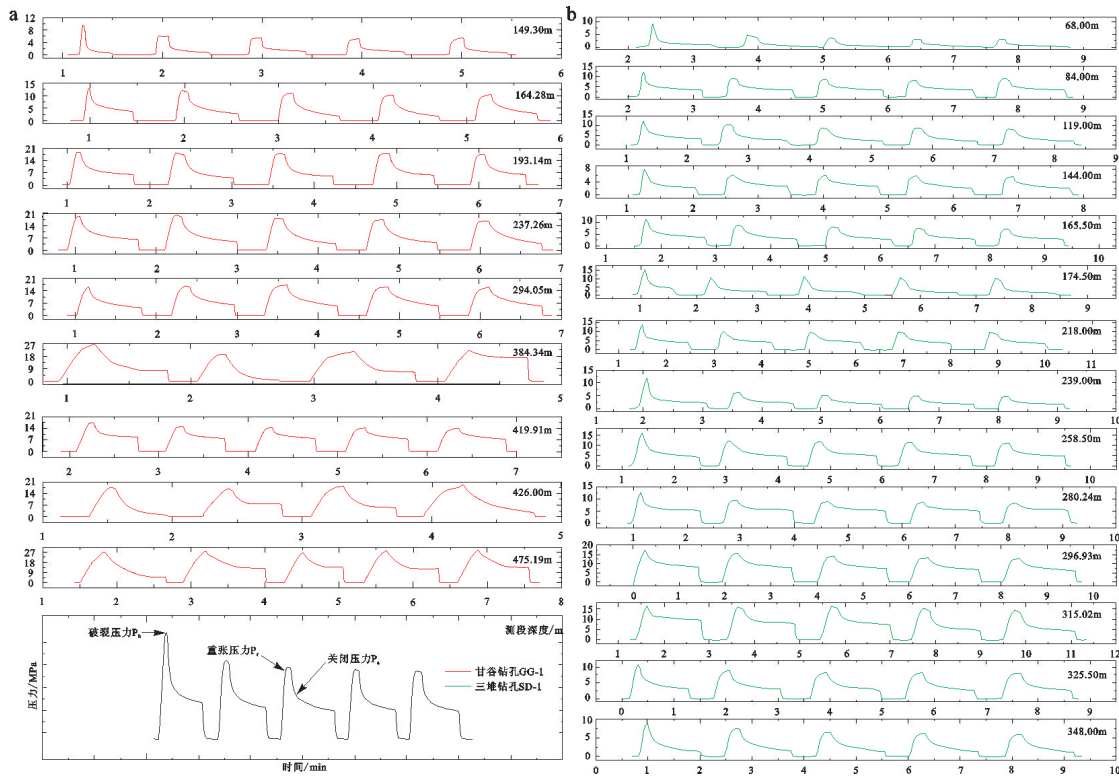


图3 水压致裂地应力测量时间-压力曲线

a—天水甘谷县钻孔(GG-1)水压致裂地应力测量时间-压力曲线;b—广元市三堆镇钻孔(SD-1)水压致裂地应力测量时间-压力曲线

Fig.3 Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement

a—Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement in GG-1 borehole; b—Curves of hydraulic fracturing in-situ stress measurement in SD-1 borehole

岩体比较破碎,仅在 149.30 m 和 237.26 m 两个深度段产生了新的近似垂直裂缝,并因为受岩体的不均质和各向异性的影响,虽然对称性较差,但基本可以用来分析该钻孔现今最大水平主压应力方位。定向印模试验结果表明在该钻孔附近最大水平主压应力方位为 N18°~63°E,平均约为 N41°E(图 4,图 6-b);在 149.30 m 处,最大水平主应力方位为 N18°E,虽然一定程度上可能受钻孔附近地形的影响反映局部应力场特征,但其应力作用方式有利于 NWW 向西秦岭北缘断层产生逆冲活动;在 237.26 m 深度,最大水平主应力方位为 N63°E,该应力作用方式则有利于 NWW 向西秦岭北缘断裂产生左旋走滑活动。

甘肃省及邻区已有震源机制解研究表明,青藏高原板块外缘从西到东最大主压应力轴方向明显呈扇形分布,且具有顺时针旋转的特点,最大主压力轴由西段的近南北向逐渐向中段顺时针转为 NEE 向,继而往东转为 NNW 向^[28]。并且在甘肃东南部主压应力轴方向空间上表现有明显的均匀性,由北部

的 NEE 向南部逐渐偏转为近 EW 向和 SEE 向,越往东部这种趋势愈明显,而位于甘东南地区北部的天水地区,主压应力轴则以 NNE 为主^[47]。甘肃省西北部至中部地区, P 和 T 轴倾角普遍较小,水平作用明显,应力场特征指示此处反映该区域易产生走滑型断裂活动,而甘东南地区,地质构造复杂,应力场特征有利于该区域易产生走滑型逆断裂^[28]。

2013 年 7 月 22 日,在甘肃省定西县发生 Ms6.6 地震,地震震源机制解 P 轴方位为 N62°E,为逆冲型地震。本次地应力测量得到的钻孔附近平均最大水平主应力方位与天水地区震源机制解 P 轴优势方位(NNE-NEE 方向)基本一致,有利于西秦岭北缘断裂产生左旋走滑兼逆冲活动(图 6)。

3.2 广元三堆镇钻孔水压致裂地应力测量结果分析

水平主应力 S_{H1} 和 S_{H2} 总体上随深度的增加而增大,最大水平主应力值随深度增加的梯度为 0.0419 MPa/m,最小水平主应力值随深度增加的线性梯度为 0.0236 MPa/m(图 5-b),其线性回归方程为:

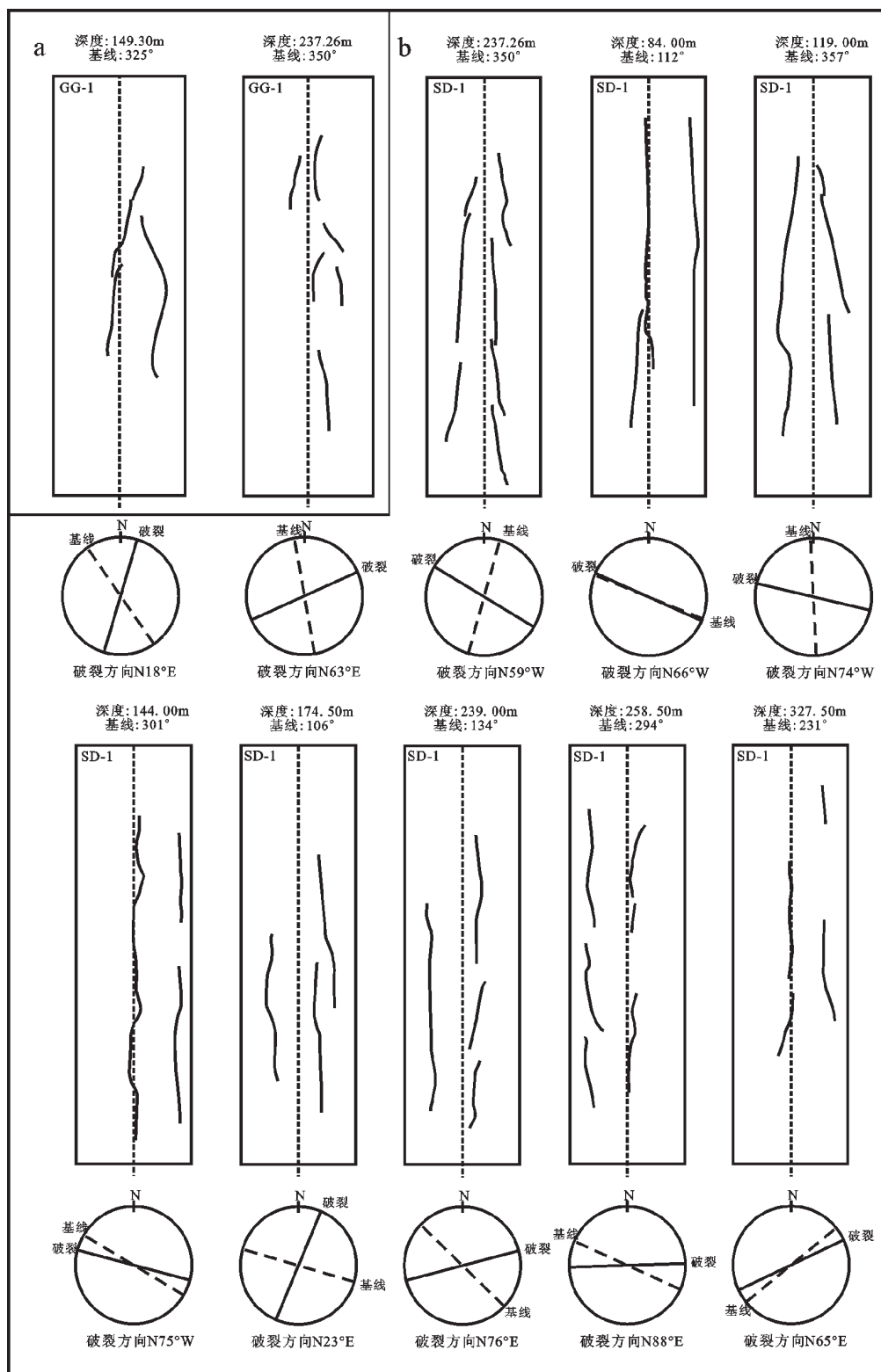


图4 水压破裂定向印模形状及其方向

a—甘谷钻孔(GG-1)水压破裂定向印模试验结果及最大主应力方位;b—三堆钻孔(SD-1)水压破裂定向印模试验结果及最大主应力方位

Fig.4 Impressions and orientations of hydraulic fractures

a—Impressions and orientations of hydraulic fractures of the GG-1 borehole;

b—Impressions and orientations of hydraulic fractures of the SD-1 borehole

表1 水压致裂地应力测量结果
Table 1 Results of in-situ stress measurement

钻孔位置	测段深度 /m	压裂特征参数/MPa					主应力值/MPa			抗拉强度/MPa	S_H 方向
		P_H	P_o	P_b	P_r	P_s	S_h	S_H	S_v	T	
天水甘谷	149.30	1.49	1.49	11.47	5.79	4.81	4.81	7.15	3.96	5.68	N18°E
	164.28	1.64	1.64	14.52	9.93	9.09	9.09	15.70	4.35	4.59	-
	193.14	1.93	1.93	20.52	17.43	14.49	14.49	24.11	5.12	3.09	-
	237.26	2.37	2.37	21.91	17.65	15.50	15.50	26.48	6.29	4.26	N63°E
	294.05	2.94	2.94	19.09	16.34	15.64	15.64	27.64	7.79	2.75	-
	384.34	3.84	3.84	30.10	20.52	15.71	15.71	22.77	10.19	9.58	-
	419.91	4.20	4.20	21.69	16.41	15.88	15.88	27.03	11.13	5.28	-
	426.00	4.26	4.26	23.52	18.47	16.95	16.95	28.12	11.29	5.05	-
	475.19	4.75	4.75	32.28	27.66	22.79	22.79	35.96	12.59	4.62	-
广元三堆	68.00	0.68	0.00	10.98	3.66	2.07	2.07	2.55	1.80	7.32	N59°W
	84.00	0.84	0.00	13.10	7.84	6.12	6.12	10.51	2.23	5.26	N66°W
	119.00	1.19	0.00	13.42	8.74	6.08	6.08	9.51	3.15	4.68	N77°W
	144.00	1.44	0.00	9.50	6.25	5.24	5.24	9.48	3.82	3.25	N75°W
	165.50	1.66	0.16	13.12	8.48	6.69	6.69	11.43	4.39	4.64	-
	174.50	1.75	0.25	18.01	11.90	7.41	7.41	10.07	4.62	6.11	N23°E
	218.00	2.18	0.69	16.31	11.91	9.08	9.08	14.63	5.78	4.40	-
	239.00	2.39	0.90	14.53	6.75	5.61	5.61	9.17	6.33	7.78	N76°E
	258.50	2.59	1.09	18.78	12.53	10.74	10.74	18.59	6.85	6.25	N88°E
	280.24	2.80	1.31	15.76	10.33	9.71	9.71	17.48	7.43	5.43	-
	296.93	2.97	1.48	20.08	14.56	13.76	13.76	25.24	7.87	5.52	-
315.02	3.15	1.66	19.75	15.93	11.33	11.33	16.39	8.35	3.82	-	
325.50	3.26	1.76	14.04	9.28	8.67	8.67	14.98	8.63	4.76	N65°E	
348.00	3.48	1.99	12.47	8.28	7.69	7.69	12.81	9.22	4.19	-	

注:表中, P_H 为静水压力, P_o 为孔隙水压力, P_b 为破裂压裂, P_r 为重张压裂, P_s 为闭合压裂, S_h 为最小水平主应力, S_H 为最大水平主应力, S_v 为垂向应力, T 为岩石原位抗拉强度。

$$S_H=0.0419H+3.98, R^2=0.5035 \quad (8)$$

$$S_h=0.0236H+2.76, R^2=0.5394 \quad (9)$$

$$S_v=0.0265H \quad (10)$$

式中, H 为钻孔深度, R^2 为回归方程相关系数。

受岩体非均质性、节理非常发育以及钻孔周围地形的影响, S_h 和 S_H 的大小随深度的线性回归相关系数不高,并且最大和最小水平主应力在84~119 m深度范围内出现水平主压力应力集中现象(图5-b),这种现象同样是受钻孔周围“U”型谷地形地貌的影响^[46]。由于三堆钻孔所处山体的坡角不大,并且山体高度显著小于甘谷钻孔所在地区,因此三堆钻孔的构造应力面深度明显小于甘谷钻孔(图5)。

在测量深度范围内,除个别测试段外,该孔应

力状态主要为 $S_H > S_h > S_v$,表明广元三堆镇地区水平应力占主导地位。并且印模优势方向明显,最大水平主应力优势方向为NWW向,平均最大水平主应力优势方向为N85°W(图4,图6-c),与汶川地震后(2009—2011年)GPS测站观测数据显示的该地区相对欧亚板块的速度场基本一致^[48](图6-d),有利于青川断裂的右旋走滑兼逆冲活动。此结果与震源机制解^[49-50]以及青川断裂野外特征显示的斜冲逆断层性质^[51]有很好的对应关系。

4 断层稳定性分析

4.1 断层滑动摩擦准则

地壳应力状态和断层的活动性之间有着密切的

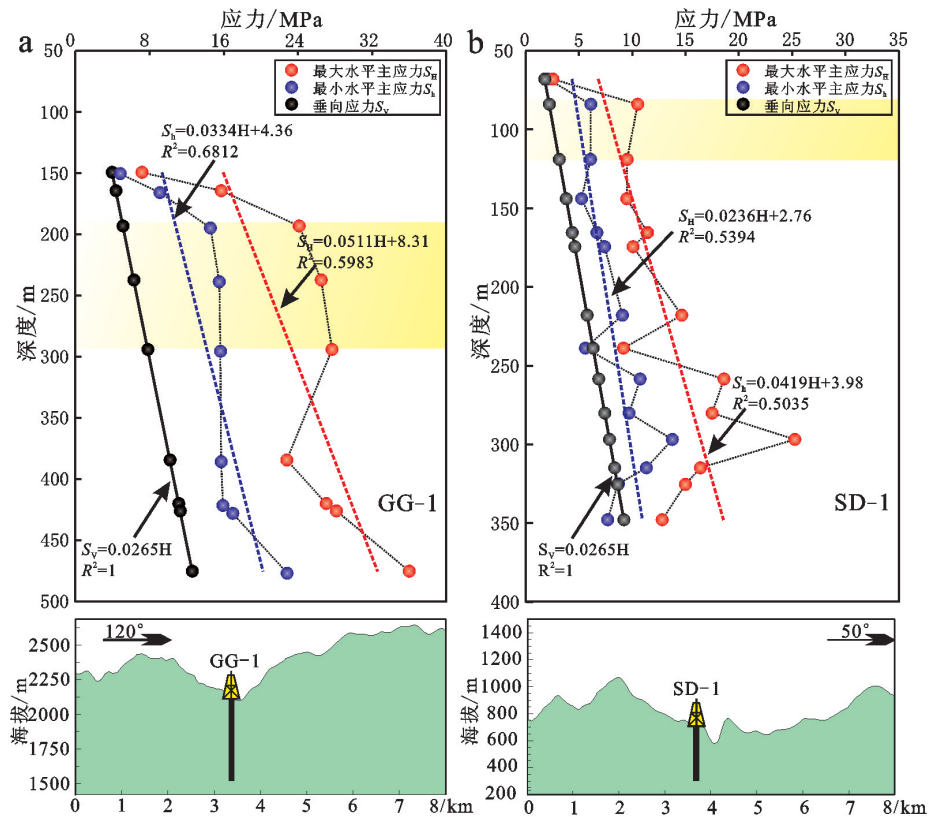


图5 主应力随深度变化曲线及钻孔所在位置的地形特征
 a—甘谷钻孔(GG-1)主应力随深度变化曲线及地形特征;b—三堆钻孔(SD-1)主应力随深度变化曲线及地形特征
 (黄色区域表示主应力受地形地貌影响范围)

Fig. 5 Curve of the stress versus depth of GG-1 and SD-1 borehole and landform characteristics around boreholes
 a—Curve of the stress versus depth in GG-1 borehole and landform characteristics around boreholes; b—Curve of the stress versus depth in SD-1 borehole and landform characteristics around boreholes
 (Yellow square patterns represent the range of principal stresses affected by topography)

关系^[8,13,52],库伦摩擦滑动准则表明,假定断层内聚力为零的条件下,如果断层面上的剪应力 τ 大于等于滑动摩擦阻力 $\mu\sigma_n$,那么断层发生滑动失稳,其中 μ 是根据试验确定的断层“摩擦系数”, S_n 是断层面上的正应力。引入主应力和有效应力的概念,有效最大与最小主应力之比可以表示为“摩擦系数”的函数(11):

$$(\sigma_1 - P_0) / (\sigma_3 - P_0) \geq [(1 + \mu^2)^{1/2} + \mu]^2 = K_\mu \quad (11)$$

式中, σ_1, σ_3 为断裂外围最大与最小主应力; P_0 为孔隙压力。

国内外的研究和实测表明,在地壳浅部低渗透率岩石中,孔隙压力与水柱静压力大致相等。最大有效主应力与最小有效主应力之比小于此值则断层稳定,若大于或等于此值则断层沿方位合适的面可能发生滑动。

Byerlee综合各种岩石的室内试验资料,发现应力值小于100 MPa条件下,大部分岩石的 μ 值在0.6~

1.0^[53];刘晓红等用双剪法测量了中国6条断裂(红河断裂、沂沭断裂、海原断裂、富蕴断裂、鲜水河断裂和小江断裂)的摩擦系数后,发现这6条断裂的摩擦系数基本在0.5~0.7,平均值为0.547^[54];张伯崇对三峡坝区花岗岩、灰岩、砂岩进行岩石力学三轴试验,结果表明三峡坝区岩石摩擦强度的下限为 $\tau=0.65\sigma_n$,上限为 $\tau=1.10\sigma_n$,平均为 $\tau=0.85\sigma_n$,同时也认为在评价浅部断层活动时, μ 取0.4~1.0比较合理^[55]。

4.2 川甘陕交汇部位地震活动危险性探讨

基于天水甘谷钻孔和广元三堆钻孔的水压致裂地应力测量结果,分别计算出该地区最大有效应力与最小有效应力的比值以及 $K_{\mu=0.4}, K_{\mu=0.6}$ 和 $K_{\mu=1.0}$ (图7),依据断层滑动摩擦准则,将 $\mu=0.4, 0.6$ 和1.0分别作为判断断层失稳时的临界摩擦系数,来探讨川甘陕交汇部位现今应力作用下区域内主要活动断层的地震危险性。

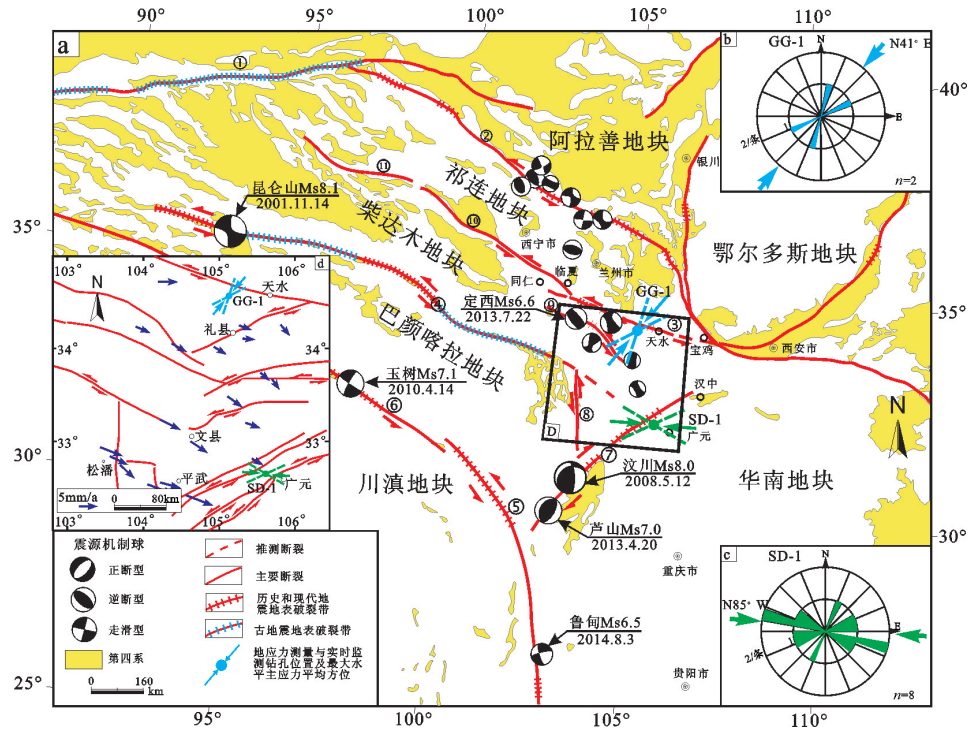


图6 川甘陕交汇部位及邻区现今构造应力场特征

①—阿尔金断裂带;②—海原断裂带;③—西秦岭北缘断裂带;④—东昆仑断裂带;⑤—鲜水河断裂带;⑥—甘孜—玉树断裂带;⑦—龙门山断裂带;⑧—虎牙断裂带;⑨—临潭—宕昌断裂带;⑩—青海南山—循化断裂带;⑪—大柴旦—宗务隆山断裂带
 a—川甘陕交汇部位现今构造应力场特征;b—天水甘谷钻孔(GG-1)水平最大水平主压力方向, n 为水压破裂定向印模试验获得的最大主应力方位的数量;c—广元三堆钻孔(SD-1)水平最大水平主压力方向, n 为水压破裂定向印模试验获得最大主应力方位的数量;d—川甘陕交汇部位相对欧亚板块的GPS速度场^[48]

Fig. 6 Characteristics of recent tectonic stress field in Sichuan-Gansu-Shaanxi border area and its adjacent areas

①—Altyn Tagh fault belt; ②—Haiyuan fault belt; ③—West Qingling fault belt;

④—East Kunlun fault belt; ⑤—Xianshuihe fault belt; ⑥—Garze-Yushu fault belt; ⑦—Longmenshan fault belt;

⑧—Huya fault belt; ⑨—Lintan-Dangchang fault belt; ⑩—Qinghaianshan-Xunhua fault belt; ⑪—Dachaidan-Zongwulong fault belt

a— Characteristics of recent tectonic stress field of Sichuan-Gansu-Shaanxi border area and its adjacent areas; b—Azimuth of maximum horizontal principal stress of the GG-1 borehole, n = Number of the result of the direction of hydraulic fracture impression; c—Azimuth of maximum horizontal principal stress of the SD-1 borehole, n = Number of the result of the direction of hydraulic fracture impression; d—Movement direction of Sichuan-Gansu-Shaanxi border area and the vicinities relative to Eurasia plate from 2009 to 2011^[48]

天水甘谷县地区现今最大有效应力与最小有效应力的比值已超过了临界值 $K_{\mu=0.6}$,局部比值甚至超过了 $K_{\mu=1.0}$ 的临界值,考虑到该钻孔受地形影响在193~294 m深度范围内产生水平主压力应力集中的现象(图5-a),其现今最大有效应力与最小有效应力的比值仍基本处于 $K_{\mu=0.6}$ 与 $K_{\mu=1.0}$ 之间(图7-a),总体反映出甘谷及邻近地区的现今应力积累程度高,表明该区现今构造活动较为强烈,在现今应力水平作用下甘谷及邻近地区附近浅部断层已达到产生滑动失稳的临界条件。广元三堆镇地区现今最大有效应力与最小有效应力的比值大部分处于 $K_{\mu=0.4}$ 与 $K_{\mu=0.6}$ 之间(图7-b),具有一定的滑动失稳危险性。

广元三堆地区现今应力水平总体小于甘谷地区,可能是受青川断裂右行走滑活动在其尾端形成拉张应力区,造就汉中断陷盆地,一系列正断层的伸展作用吸收青川断裂的大部分右行走滑量^[41],导致广元地区应力得以部分释放,也可能因为汶川地震已释放了部分能量所致,具体原因还需要更多资料进行验证。总体上川甘陕交汇地区的现今应力水平较高,已达到一定程度的滑动失稳的临界条件,这主要是受印度板块和欧亚板块的碰撞与挤压影响,青藏高原北部出现块体向东“挤出”的趋势^[21,24,32],并在鄂尔多斯地块和华南地块的阻挡作用下,从而使川甘陕交汇构造部位成为青藏高原东北部地壳浅部块

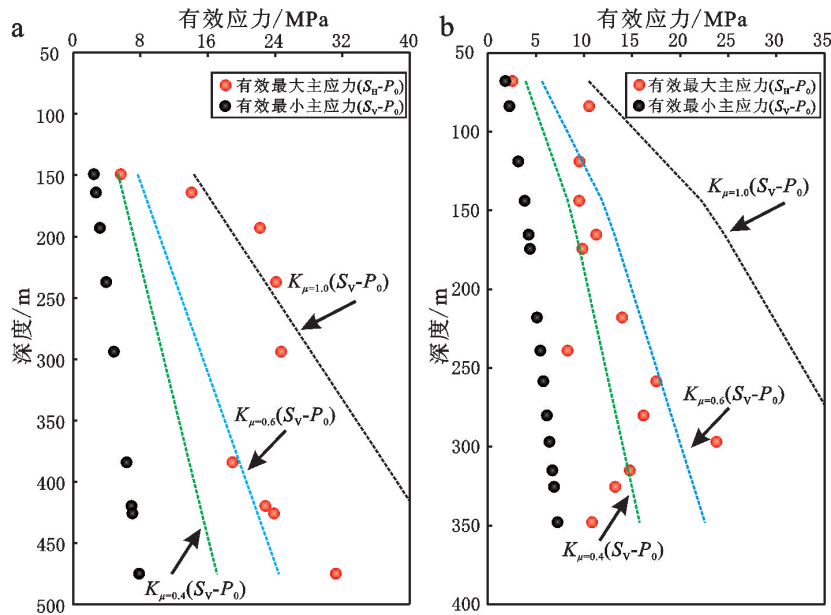


图7 川甘陕交汇地区最大有效应力、最小有效应力以及临界摩擦系数的关系

a—天水甘谷最大有效应力、最小有效应力及临界摩擦系数；b—广元三堆最大有效应力、最小有效应力及临界摩擦系数

Fig.7 The effective maximum and minimum horizontal principal stress and critical friction coefficient

a—The effective maximum and minimum horizontal principal stress in Gangu and critical friction coefficient; b—The effective maximum and minimum horizontal principal stress in Sandui and critical friction coefficient

体物质往东运移的大闸口^[20,34],导致川甘陕地区构造应力较易集中,因而该构造部位发生地震的危险性高。

5 结论

天水甘谷地区水平主应力大小总体上随深度的增加而增大,并且存在很大的水平应力,钻孔附近属于高地应力环境。3个主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_v$ 。钻孔附近地壳浅表层的最大水平主压应力方位平均为 $N41^\circ E$ 。最大水平主压应力方向与天水地区现今构造应力场方位基本一致,有利于钻孔附近NWW向西秦岭北缘断层产生左旋走滑兼逆冲活动。

广元三堆地区水平主应力大小总体上随深度的增加而增大,3个主应力之间的关系为 $S_H > S_h > S_v$,同时钻孔附近地壳浅表层的最大水平主压应力方位平均为 $N85^\circ W$,有利于青川断裂的右行走滑兼逆冲活动。

库仑摩擦滑动准则分析表明,天水甘谷地区现今最大有效应力与最小有效应力的比值已超过了临界值 $K_{\mu=0.6}$,局部比值甚至超过了 $K_{\mu=1.0}$ 的临界值,甘谷及邻近地区的现今应力积累程度高,断裂活动已经进入临界状态。广元三堆地区现今最大有效应力与最小有效应力的比值总体处于 $K_{\mu=0.4}$ 和 $K_{\mu=0.6}$ 之间,具有一

定的断裂失稳的危险性。因此,加强川甘陕交汇地区活动断裂的监测,对于对该关键构造部位地质环境安全评价以及防灾减灾具有重要的意义。

参考文献(References):

- [1] 李四光. 论地震[M]. 北京: 地质出版社, 1977.
Li Siguang. The earthquake [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1977. (in Chinese)
- [2] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(3): 1109–1121.
Feng Chengjun, Chen Qunce, Tan Chengxuan, et al. Analysis on current in-situ stress state in northern segment of Longmenshan Fault belt [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1109–1121 (in Chinese with English abstract).
- [3] 陈群策, 安其美, 孙东生, 等. 山西盆地现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 地球学报, 2010, 31(4): 541–548.
Chen Qunce, An Qimei, Sun Dongsheng, et al. Current In-situ Stress State of Shanxi Basin and Analysis of Earthquake Risk [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2010, 31(4): 541–548 (in Chinese with English abstract).
- [4] 丰成君, 陈群策, 吴满路, 等. 四川省大凉山腹地当前地应力状态分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2010, 29(4): 468–474.
Feng Chengjun, Chen Qunce, Wu Manlu, et al. Analysis of the present stress state in the hinterland of Daliang Mountain in Sichuan province [J]. Journal of Henan Polytechnic University

- (Natural Science), 2010, 29(4): 468–474 (in Chinese with English abstract).
- [5] 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等. 广州核电站地应力测量及其应用[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1745–1752.
Feng Chenjun, Chen Qunce, Tan Chengxuan, et al. In-situ stress measurement and its application to Guangdong nuclear power stations [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1745–1752 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丰成君, 张鹏, 孙炜峰, 等. 日本Mw9.0级地震对中国华北—东北大陆主要活动断裂带的影响及地震危险性初步探讨[J]. 地学前缘, 2013, 20(6): 123–140.
Feng Chenjun, Zhang Peng, Sun Weifeng, et al. A discussion the impact of Japan Mw9.0 earthquake on the main active fault zone in north and northeast—China continent and the seismic risk [J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(6): 123–140 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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, 2013, 28(3): 1150–1160 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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(1): 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(1): 2870–2876 (in Chinese with English abstract).
- [9] 谭成轩, 孙叶, 王连捷. 地应力测量值得注意的若干问题[J]. 地质力学学报, 2003, 9(3): 276–280.
Tan Chengxuan, Sun Ye, Wang Lianjie. Some problems of in-situ crustal stress measurements [J]. Journal of Geomechanics, 2003, 9(3): 276–280 (in Chinese with English abstract).
- [10] 谭成轩, 孙炜峰, 孙叶, 等. 地应力测量及其地下工程应用的思考[J]. 地质学报, 2006, 80(10): 1627–1632.
Tan Chengxuan, Sun Weifeng, Sun Ye, et al. A consideration on in-situ crustal stress measuring and its underground engineering application [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(10): 1627–1632 (in Chinese with English abstract).
- [11] 谭成轩, 孙叶, 吴树仁, 等. “5.12”汶川Ms8.0大地震后关于我国区域地壳稳定性评价的思考[J]. 地质力学学报, 2009, 15(2): 142–150.
Tan Chengxuan, Sun Ye, Wu Shuren, et al. A consideration on regional crustal stability assessment after Ms8.0 Wenchuan strong earthquake in China [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15(2): 142–150 (in Chinese with English abstract).
- [12] 吴满路, 张岳桥, 廖椿庭, 等. 汶川Ms8.0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 Chuanting, et al. Research on the stress state along the Longmenshan fault belt after the Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(3): 1122–1130 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张鹏, 秦向辉, 丰成君, 等. 郯庐断裂带山东段深孔地应力测量及其现今活动性分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2329–2335.
Zhang Peng, Qin Xianghui, Feng Chengjun, et al. In-situ stress measurement of deep borehole in Shandong segment of Tan-Lu fracture belt and analysis on its activity [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2329–2335 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张培震, 徐锡伟, 闻学泽, 等. 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[J]. 地球物理学报, 2008, 51(4): 1066–1073.
Zhang Peizhen, Xu Xiwei, Wen Xueze, et al. Slip rates and recurrence intervals of the active fault zone and tectonic implications for the mechanism of the Ms8.0 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(4): 1066–1073 (in Chinese with English abstract).
- [15] 李海兵, 王宗秀, 付小方, 等. 2008年5月12日汶川地震(MS8.0)地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质, 2008, 35(5): 803–813.
Li Haibing, Wang Zongxiu, Fu Xiaofang, et al. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake (Ms8.0) happened on May 12th, 2008 [J]. Geology in China, 2008, 35(5): 803–813 (in Chinese with English abstract).
- [16] Wu M, Zhang Y, Liao C, et al. Preliminary results of in-situ stress measurements along the Longmenshan fault zone after Wenchuan Ms8.0 earthquake [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(4): 746–753.
- [17] 孙叶, 谭成轩, 苗培实, 等. 地震地质与地震预报[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
Sun Ye, Tan Chengxuan, Miao Peishi, et al. Some Tentative Ideas about Seismo – Geological Work [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012 (in Chinese).
- [18] 陈群策, 丰成君, 孟文, 等. 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): 3923–3932.
Chen Qunce, Feng Chenjun, Meng Wen, et al. Analysis of in situ 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).
- [19] 张岳桥, 李海龙. 龙门山断裂带西南段晚第四纪活动性调查与分析[J]. 第四纪研究, 2010, 30(4): 699–710.
Zhang Yueqiao, Li Hailong. Late Quaternary active faulting along the SW segment of the Longmenshan fault zone [J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(4): 699–710 (in Chinese with English

- abstract).
- [20] 谭成轩, 秦向辉, 王瑞江, 等. 中国大陆中东部 $M_s \geq 8.0$ 级特大地震震发震背景初步分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 3598–3607.
Tan Chengxuan, Qin Xianghui, Wang Ruijiang, et al. Preliminary analysis of earthquake occurrence backgrounds of $M_s \geq 8.0$ catastrophic earthquakes in middle and east parts of Chinese continent [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 3598–3607 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张培震, 王琪, 马宗晋. 中国大陆现今构造运动的GPS速度场与活动地块[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 430–441.
Zhang Peizhen, Wang Qi, Ma Zongjin. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 430–441 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王琪, 张培震, 马宗晋. 中国大陆现今构造变形GPS观测数据与速度场[J]. 地学前缘, 2002, 9(2): 415–429.
Wang Qi, Zhang Peizhen, Ma Zongjin. GPS database and velocity field of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. Earth Science Frontiers, 2002, 9(2): 415–429 (in Chinese with English abstract).
- [23] 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, 2008, 82(12): 1613–1622.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Wu Zhongliang. Wenchuan Earthquake and Scientific Drilling [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(12): 1613–1622 (in Chinese with English abstract).
- [24] Zhang P Z, Shen Z K, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. Geology, 2004, 32(9): 809–812.
- [25] 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.
Xie Furen, Chen Qunce, Cui Xiaofeng, et al. Study of Crustal Stress Environment in China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003 (in Chinese).
- [26] 李勇, 曹叔尤, 周荣军, 等. 晚新生代岷江下蚀速率及其对青藏高原东缘山脉隆升机制和形成时限的定量约束[J]. 地质学报, 2005, 79(1): 28–37.
Li Yong, Cao Shuyou, Zhou Rongjun, et al. Late Cenozoic Min river incision rate and its constraint on the uplift of the eastern margin of the Tibetan plateau [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(1): 28–37 (in Chinese with English abstract).
- [27] 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 Letters, 2003, 30(20): 2027–2030.
- [28] 卜玉菲, 万永革, 张元生. 甘肃及邻近地区构造应力场[J]. 地震地质, 2013, 35(4): 833–841.
Bu Yufei, Wan Yongge, Zhang Yuansheng. Tectonic stress analysis in Gansu and its adjacent areas [J]. Seismology and Geology, 2013, 35(4): 833–841 (in Chinese with English abstract).
- [29] Beck R A, Burbank D W, Sercombe W J, et al. Stratigraphic evidence for an early collision between northwest India and Asia [J]. Nature, 1995, 373: 55–58.
- [30] Lee T Y, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia [J]. Tectonophysics, 1995, 251: 85–138.
- [31] Patzel A, Li H M, Wang J D, et al. Palaeomagnetism of Cretaceous to Tertiary sediments from southern Tibet: evidence for the extent of the northern margin of India prior to the collision with Eurasia [J]. Tectonophysics, 1996, 259: 259–284.
- [32] Tapponnier P, Xu Z, Roger F, et al. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau [J]. Science, 2001, 1671–1677.
- [33] 王成善, 戴紫根, 刘志飞, 等. 青藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展[J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 1–30.
Wang Chengshan, Dai Jingen, Liu Zhifei, et al. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review [J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(3): 1–30 (in Chinese with English abstract).
- [34] 康来迅. 西秦岭北缘断裂带晚更新世晚期以来断裂运动的基本特征及运动机理[J]. 中国地震, 1990, 6(3): 53–61.
Kang Laixun. A study on movement characteristics and mechanism of the fault zone along the north edge of west Qinling Mountains since late Epipleistocene epoch [J]. Earthquake Research in China, 1990, 6(3): 53–61 (in Chinese with English abstract).
- [35] 郑文俊, 袁道阳, 何文贵, 等. 甘肃东南区构造活动与2013年岷县–漳县 $M_s 6.6$ 级地震孕育机制[J]. 地球物理学报, 2013, 56(12): 4058–4071.
Zheng Wenjun, Yuan Daoyang, He Wengui, et al. Geometric pattern and active tectonics in southeastern Gansu Province: Discuss on seismogenic mechanism of the Minxian–Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake on July 22, 2013 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(12): 4058–4071 (in Chinese with English abstract).
- [36] 邵延秀, 袁道阳, 王爱国, 等. 西秦岭北缘断裂破裂分段与地震危险性评估[J]. 地震地质, 2011, 33(1): 79–90.
Shao Yanxiu, Yuan Daoyang, Wang Aiguo, et al. The segmentation of rupture and estimate of earthquake risk along the north margin of western Qinling fault zone [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 79–90 (in Chinese with English abstract).
- [37] 腾瑞增, 金瑶泉, 李西候, 等. 西秦岭北缘断裂带新活动特征[J]. 西北地震学报, 1994, 16(2): 85–90.
Teng Ruizeng, Jin Yaoquan, Li Xihou, et al. Recent activity characteristics of the fault zone at northern edge of western Qinling Mountains [J]. Northwest seismological Journal, 1994, 16(2): 85–90 (in Chinese with English abstract).
- [38] 雷中生, 袁道阳, 葛伟鹏, 等. 734年天水7级地震考证与发震构造分析[J]. 地震地质, 2007, 29(1): 51–62.
Lei Zhongsheng, Yuan Daoyang, Ge Weipeng, et al. Textual research on the Tianshui 7 earthquake in 734 AD and analysis of

- its causative structure [J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 51–62 (in Chinese with English abstract).
- [39] 袁道阳, 雷中生, 葛伟鹏, 等. 对143年甘谷西7级地震史料的新见解[J]. *西北地震地质*, 2007, 29(1): 58–63.
- Yuan Daoyang, Lei Zhongsheng, Ge Weipeng, et al. A new opinion about the west of Gansu M7.0 earthquake in 143 A.D. in Gansu Province [J]. *Northwest seismological Journal*, 2007, 29(1): 58–63 (in Chinese with English abstract).
- [40] 王全伟, 梁斌, 谢启兴, 等. 青川地区青川断裂带的显微构造及其变形条件研究[J]. *矿物岩石*, 2000, 20(1): 87–90.
- Wang Quanwei, Liang Bin, Xie Qixing, et al. Research on microstructures and deformation conditions of the Qingchuan fault zone [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2000, 20(1): 87–90 (in Chinese with English abstract).
- [41] 樊春, 王二七, 王刚, 等. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究——以青川断裂为例[J]. *地质科学*, 2008, 43(3): 417–433.
- Fan Chun, Wang Erqi, Wang Gang, et al. Dextral strike-slip and tectonic transformation of the northern Longmen Shan fault belt from Late Neogene—A case study from the Qingchuan fault [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(3): 417–433 (in Chinese with English abstract).
- [42] 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性[J]. *地质力学学报*, 2009, 15(2): 114–130.
- Peng Hua, Ma Xiumin, Jiang Jingjie. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains [J]. *Journal of Geomechanics*, 2009, 15(2): 114–130 (in Chinese with English abstract).
- [43] 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 & Mining Sciences*, 2003(40): 1011–1020.
- [44] 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 p_c 的常用判读方法讨论[J]. *岩土力学*, 2012, 33(7): 2149–2159.
- Feng Chengjun, Chen Qunce, Wu Manlu, et al. Analysis of hydraulic fracturing stress measurement data—discussion of methods frequently used to determine instantaneous shut-in pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(7): 2149–2159 (in Chinese with English abstract).
- [45] Zoback M D, Healy J H. In-situ stress measurements to 3.5km depth in the Cajon. Pass Scientific research borehole: implications for the mechanics of crustal faulting [J]. *Journal of Geophysical research*. 1992, 97(B4):5039–5057.
- [46] Tan C X, Wang R, 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 & Mining Sciences*, 2004, 41: 303–310.
- [47] 卜玉菲, 张元生, 万永革, 等. P波极性揭示的甘东南地区构造应力场特征[J]. *地震工程学报*, 2013b, 35(1): 160–165.
- Bu Yufei, Zhang Yuansheng, Wan Yongge, et al. The tectonic stress field in southeastern area of Gansu Province deduced from P wave polarity data [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2013, 35(1): 160–165 (in Chinese with English abstract).
- [48] 陈长云, 任金卫, 孟国杰, 等. 巴颜喀拉块体北东缘主要断裂现今活动性分析[J]. *大地测量与地球动力学*, 2012, 32(3): 27–30.
- Chen Changyun, Ren Jinwei, Meng Guojie, et al. Analysis of modern activity of major faults in northeast margin of Baryan-Har Block [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012, 32(3): 27–30 (in Chinese with English abstract).
- [49] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川8.0级地震震源过程[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5): 1403–1410.
- Wang Weimin, Zhao Lianfeng, Li Juan, et al. Rupture process of the Ms8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5): 1403–1410 (in Chinese with English abstract).
- [50] Zhang Y, Ma H S, Lü J, et al. Source mechanism of strong aftershocks ($M_s \geq 5.6$) of the 2008/05/12 Wenchuan earthquake and the implication for seismotectonics [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2009, 52(6): 739–753.
- [51] 代建全. 四川省青川断裂的特征及形成的物理条件[J]. *四川地质学报*, 1992, 12(4): 311–319.
- Dai Jianquan. The features and deformation conditions of Qingchuan fracture, Sichuan [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1992, 12(4): 311–319 (in Chinese with English abstract).
- [52] 童亨茂. 岩石圈脆性断层作用力学模型[J]. *自然杂志*, 2013, 35(1): 56–63.
- Dong Hengmao. Mechanical model of brittle faulting in lithosphere [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2013, 35(1): 56–63 (in Chinese with English abstract).
- [53] Byerlee J D. Friction of rocks [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4–5): 615–626.
- [54] 刘晓红, 方亚如, 蔡戴恩, 等. 中国六条断裂断层泥的摩擦系数[J]. *东北地震研究*, 1987, 3(1): 23–26.
- Liu Xiaohong, Fang Yaru, Cai Daien, et al. Study on the friction coefficient of fault gouge for six faults in China [J]. *Northeastern Seismological Research*, 1987, 3(1): 23–26 (in Chinese with English abstract).
- [55] 张伯崇. 孔隙压力、断层滑动准则和水库蓄水的影响[C]//苏恺之, 李方全, 张伯崇, 等主编. 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.
- Zhang Bochong. Pore pressure, fault slip criterion and influence of reservoir impounding [C]// Su Kaizhi, Li Fangquan, Zhang Bochong, et al. (eds.). *Integrated Research on the Stress Field and Pore Pressure at the Gorges Site*. Beijing: Seismological Press, 1996 (in Chinese).