

周永胜,何昌荣. 汶川地震区的流变结构与发震高角度逆断层滑动的力学条件. 地球物理学报, 2009, 52(2):474~484  
Zhou Y S, He C R. The rheological structures of crust and mechanics of high-angle reverse fault slip for Wenchuan  $M_s8.0$  earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(2):474~484

## 汶川地震区的流变结构与发震高角度 逆断层滑动的力学条件

周永胜,何昌荣

中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室,北京 100029

**摘 要** 本文利用龙门山地区的地质、地球物理剖面、弹性波速和流变实验数据等,建立了汶川地震相关构造单元的地壳流变结构. 川西高原和龙门山构造带的地壳流变结构中存在着多个塑性流变层,而四川盆地地壳基本没有出现塑性流变层,这种复杂的流变结构是汶川地震孕育和发生的基础. 岩石破裂-黏滑-摩擦实验表明,以二长花岗岩为代表的震源区岩石具有很高的破裂强度和摩擦强度,能够承受极大的差应力和积累巨大的能量,这是高角度逆断层能够滑动和汶川地震强度大的原因之一. 高流体压力是高角度逆断层滑动和触发汶川地震的另一个必要条件,而龙门山断层带内可能存在这种比较高的流体压力.

**关键词** 汶川地震,高角度逆断层,流变结构,大的差应力,高流体压力

文章编号 0001-5733(2009)02-0474-11

中图分类号 P315

收稿日期 2009-01-15,2009-01-23 收修定稿

### The rheological structures of crust and mechanics of high-angle reverse fault slip for Wenchuan $M_s8.0$ earthquake

ZHOU Yong-Sheng, HE Chang-Rong

State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

**Abstract** The rheological structures of tectonic units related to Wenchuan earthquake is estimated based on geological and geophysical field data, as well as experimental P-velocity and creep data. There are two to three plastic layers in western Sichuan plateau and Longmenshan tectonic zone, but it is almost no any plastic layer in Sichuan basin. It plays a significant role for the complicated rheological structures to accumulate the tectonic stress and forming Wenchuan earthquake. The high temperature and high pressure experiments show that the strength of rocks is very high in earthquake source (mainly granitic rocks, such as adamellite), which could sustain great different stress and accumulate huge energy. This is one of major causes for high-angle reverse fault slip and high intensity of Wenchuan earthquake. However, high fluid pressure is a necessary condition for sliding of high-angle reverse fault and triggering Wenchuan earthquake, and Longmenshan tectonic zone might have provided with the requirement.

**Keywords** Wenchuan earthquake, High-angle reverse fault, Rheological structure, Great different stress, High fluid pressure

# 1 引言

在 5.12 汶川  $M_s 8.0$  级地震中,沿映秀—北川断裂出现长达 240 km 的地表破裂,地表破裂的南段表现以逆冲为主,伴有一定的右行走滑,北段为逆冲兼走滑;沿灌县—江油断裂形成一条长达 90 km 的地表逆冲破裂带<sup>[1~3]</sup>.地表破裂带显示,破裂面具有高倾角特征<sup>[1~4]</sup>.初步研究表明,发震断层映秀—北川断裂以及在此次地震中同时滑动的灌县—江油断层在上地壳为高角度逆断层,断层倾角在  $50^\circ \sim 80^\circ$  之间<sup>[3]</sup>.而龙门山山前隐伏低角度逆断层在此次地震中除了局部出现喷水冒沙外,没有明显的活动迹象<sup>[1~3,5]</sup>.这种反序断层活动<sup>[6]</sup>与这一地区的深部构造环境密切相关.

根据摩擦和流变实验得到的地壳脆塑性转化深度<sup>[7~9]</sup>与地震深度分布具有很好的一致性<sup>[8,10,11]</sup>表明,地壳流变结构是认识地震孕育和发生环境的有效途径之一.台湾地区的流变结构对认识 1999 年 9.12 集集地震的孕育环境起到了重要作用<sup>[12]</sup>.断层的强度和摩擦滑动稳定性控制了强震的发震深度,脆塑性转化深度控制了余震深度<sup>[11]</sup>.在脆性变形域,断层摩擦强度随深度增加而线性增加,而断层摩擦滑动稳定性随深度发生变化,在地壳浅层,由于断层强度和断层正压力较小,断层表现为稳滑;随着深度增加,断层出现黏滑,在接近脆塑性转化域,由于

温度升高岩石出现半脆性变形,断层滑动又转化为稳滑.在塑性变形域,岩石流变强度随深度增加而非线性减少.因此,在脆-塑性转化带之上,断层强度最大,而且具有黏滑的条件,最有可能形成强震.在脆-塑性转化带内,岩石表现出半脆性变形,虽然不具备发生强震的条件,但可能发生余震.在塑性变形域,理论上不具备发生余震的条件.

## 2 汶川地震区的地壳流变结构与地震孕育环境

### 2.1 川西高原、龙门山构造带和四川盆地的地壳流变结构

根据多条跨越川西高原、龙门山构造带和四川盆地的地球物理剖面给出的 P 波速度结构<sup>[13~17]</sup>、区域地质资料、高温高压波速实验、流变实验结果,结合以热流数据和热传导方程为基础计算出的地壳温度分布,获得了川西高原、龙门山构造带和四川盆地的地壳流变结构(图 1).具体方法参见何昌荣等<sup>[18]</sup>、周永胜等<sup>[11]</sup>.

在川西高原的地壳流变结构中,出现三个脆塑性转化带,其中,中地壳脆塑性转化深度在 15 km 左右,与重新定位后的小震深度基本一致,而塑性流变层在 15~20 km 与缺震层在深度上一致<sup>[19]</sup>.

在龙门山构造带的流变结构中,中下地壳各出现一个塑性流变层,其中,中地壳脆塑性转化深度为

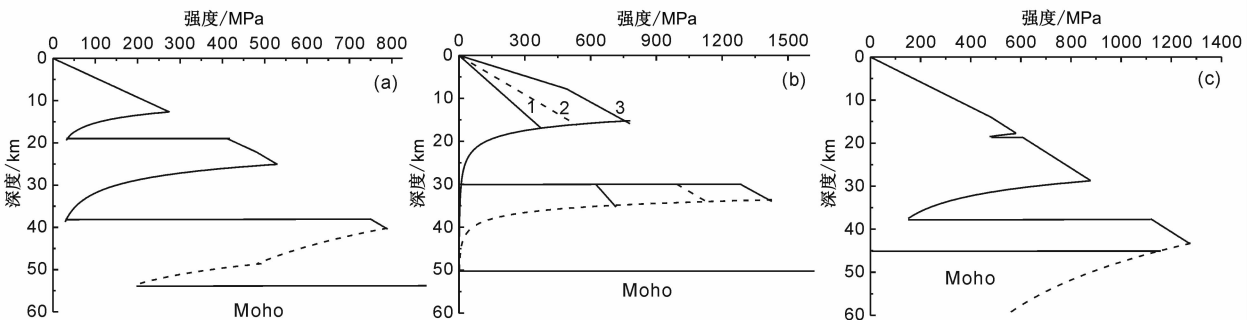


图 1 龙门山地区地壳流变结构

(a) 川西高原; (b) 龙门山构造带; (c) 四川盆地.

图中的直线是断层摩擦强度(流体孔隙压为静水压),曲线是岩石的流变强度(实线和虚线分别代表长英质岩石和基性岩).

其中,川西高原和四川盆地仅给出了走滑断层情况下的摩擦强度,而龙门山构造带分别给出了

走滑(直线 1)、逆冲走滑(直线 2)和逆冲(直线 3)情况下的摩擦强度.

Fig. 1 The rheological structure of crust in Longmenshan region

(a) Western Sichuan plateau; (b) Longmenshan tectonic zone; (c) Sichuan basin.

In figures, straight line stands for strength of fault friction (pore pressure is hydrostatic pressure), curve line stands for rheological strength of rock (solid curve stands for felsic rock, and dash curve for mafic rock). The strength of fault is for case of strike slip in western Sichuan plateau and Sichuan basin but for cases of strike slip (line 1),

strike slip-reverse (line 2) and reverse (line 3).

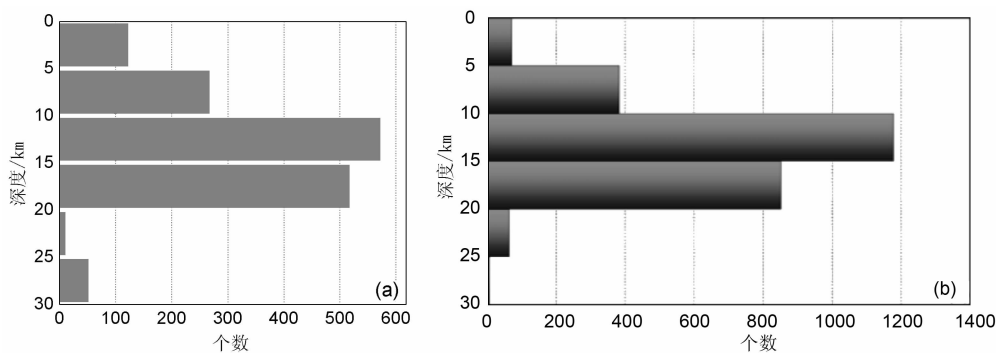


图2 四川台网记录到的汶川  $M_s 8.0$  地震的余震经过重新定位后的深度分布

(a) 6月26日之前记录到的余震经过重新定位后的深度分布(根据朱艾澜等<sup>[21]</sup>给出的数据绘制);

(b) 7月8日之前记录到的余震经过重新定位后的深度分布(引自黄媛等<sup>[22]</sup>).

Fig. 2 The focal depth distribution of relocated aftershocks for Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake

(a) The focal depth distribution of relocated aftershocks recorded before 26<sup>th</sup> June (plotted according to data given by Zhu Ailan et al. <sup>[21]</sup>);

(b) The focal depth distribution of relocated aftershocks recorded before 8<sup>th</sup> July (from Huang Yuan et al. <sup>[22]</sup>).

15~20 km,与汶川地震的主震深度(13~19 km)非常接近<sup>[20~24]</sup>. 17个中强( $M_s \geq 5.0$ )余震重新定位后的震源深度主要分布在8~20 km深度范围,且以 $32.5^\circ N$ 为界,小于15 km的强余震都在南部,而北部深度在17~20 km<sup>[20]</sup>. 多个研究组采用双差定位法对四川台网记录到的<sup>[21~23]</sup>和川西流动地震台阵观测数据与震后应急地震观测台站记录到的<sup>[24]</sup>汶川地震的余震( $M_s \geq 2.0$ )进行了重新定位,虽然各自给出的定位结果在某些细节上不完全相同,但绝大部分余震分布在5~20 km深度,其中,余震深度分布主要集中于10~20 km的深度范围(图2). 主震和余震的这种优势分布特征与龙门山构造带的流变结构的中上地壳脆塑性转化深度比较吻合.

四川盆地的流变结构与川西高原不同,在30 km以上基本没有出现塑性流变层,显示出刚性地壳的特点. 如果考虑逆冲断层强度,则四川盆地的断层摩擦强度比图中给出的强度高约两倍.

## 2.2 地壳流变结构揭示出的地震孕育环境

川西高原的多层塑性流变结构有利于中地壳和下地壳流动. 因为川西高原的中下地壳流变强度比正常地壳软弱,并且其与邻近四川盆地和华南地块的地壳厚度差达20~30 km、地貌高度差达3000~4000 m,从而形成能够驱动中下地壳软弱层发生流动的横向压力差,从底部拖曳着被断裂切割的上部脆性地壳,发生以左旋走滑为主的变形和运动<sup>[25]</sup>. 这种地壳流变结构差异和断层的运动方式加速了松潘—甘孜块体和川滇块体向东南运动,这也是东昆仑断裂、鲜水河断裂—安宁河断裂—则木河断裂—小江断裂具有较大左行走滑滑动速率的原因. 红河—哀牢山断裂由左行走滑向右行走滑转变可能是

松潘—甘孜块体和川滇块体向东南加速运动的结果. 夹在东昆仑断裂和鲜水河断裂之间的松潘—甘孜块体不断向东南运动<sup>[2,3,26~29]</sup>,导致龙门山构造带地壳的流变层不断向四川盆地推覆与斜冲,而流变层之上的脆性层(强度极高的彭灌杂岩)受到高流变强度的四川盆地阻挡,使具有右行兼逆冲特征的龙门山断层带基本处于闭锁状态,表现出非常小的滑动速率. 并导致应变在不同的断裂上积累<sup>[25]</sup>,当应力积累达到彭灌杂岩的破裂强度或者高角度的北川—映秀断裂的摩擦强度时,断层突然发生黏滑错动,形成了5.12汶川  $M_s 8.0$  级地震.

## 3 汶川 $M_s 8.0$ 级地震高角度逆断层滑动的力学条件

### 3.1 高角度逆断层滑动需要具备的力学条件

根据摩尔-库仑准则和 Byerlee 定律,在地壳浅部,断层的摩擦强度小于岩石破裂强度,在地壳深部,随着正应力增加,摩擦强度可能接近岩石破裂强度. 根据 Byerlee 定律,在低压(地壳浅部)和高压(地壳深部)条件下,断层摩擦系数分别为0.85和0.6,在没有流体孔隙压条件下,对应的最有利于滑动的断层倾角分别为 $25.5^\circ$ 和 $29.5^\circ$ . 根据库仑破裂准则,岩石的破裂面与最大主应力之间的夹角通常为 $30^\circ$ ,对逆断层而言(最大主应力水平,最小主应力垂直),新产生的逆断层倾角通常应该在 $30^\circ$ 左右. 大量摩擦实验表明,由主要造岩矿物(石英、长石、辉石等)构成的断层泥,断层的摩擦系数平均值为0.75,在静水压条件下,这种逆断层的倾角为 $26.6^\circ$ 时最容易滑动<sup>[3,28]</sup>. 逆断层倾角与岩石摩擦系数或

岩石内摩擦角负相关,而地壳浅部软弱岩石的内摩擦角比较小.这就是多数逆断层具有铲式形态(浅部倾角大深部倾角小)或低倾角楔形的原因.

逆断层比正断层和走滑断层具有更高的强度,在相同摩擦系数、流体压力、温度等条件下,一个倾角  $30^\circ$  的逆断层滑动所需的剪应力比正断层高约 4 倍,比走滑断层高约 2 倍.随着断层倾角增加,逆断层滑动所需的应力逐渐增大.

地表破裂和地震破裂过程反演表明,汶川  $M_s 8.0$  级地震中有显著滑动的两条逆断层的倾角都比较大<sup>[1~3,5,21~24,28,29]</sup>,其中,映秀—北川断层的倾角在  $68^\circ \sim 80^\circ$  之间,灌县—江油断层的倾角在  $48^\circ \sim 60^\circ$  之间<sup>[3,28]</sup>.余震分布和震源机制解表明(与张培震交流),断层在深部仍然表现为高角度特征.余震深度分布剖面清晰地显示了映秀—北川断裂和灌县—江油断裂以及汶川—茂汶断裂在 20 km 以上表现出高角度西倾的特点<sup>[22]</sup>,在  $20 \sim 22$  km<sup>[24]</sup>(或  $20 \sim 25$  km<sup>[23]</sup>)深度合并为剪切带.这种高角度逆断层在理论上不符合摩尔-库仑准则和 Byerlee 定律,在实际地质构造中并不多见,也是最不容易滑动的一类断层.

对于逆断层,最大主应力  $\sigma_1$  为水平方向,最小主应力  $\sigma_3$  为垂直方向.

$$\sigma_3 = \rho_r gh, \quad (1)$$

$$P_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta, \quad (2)$$

$$f = (P_n - P_f)\mu, \quad (3)$$

其中,  $\rho_r$  为岩石密度,  $h$  为深度,  $P_f$  为流体孔隙压力,  $\theta$  为断层倾角,  $\mu$  为断层摩擦系数,  $f$  为摩擦强度.

根据方程(3),高角度逆断层滑动需要的力学条件为:(1)存在很大的差应力  $\sigma_1 - \sigma_3$ ;(2)比较低的摩擦系数  $\mu$ ;(3)较大的流体压力  $P_f$ .下面就针对这三个条件分别进行分析与讨论.

### 3.2 震源区存在高强度的岩石以承受较大的差应力和积累巨大的能量

地壳岩石的破裂强度或断层的摩擦强度控制断层滑动与能量积累,只有震源区存在强度极高的岩石(破裂强度和摩擦强度),才能承受非常高的最大主应力和差应力,从而积累巨大能量,形成强震.花岗质岩石(通常是中上地壳地震层的主体岩石<sup>[30,31]</sup>)和被石英、长石愈合了的断层就具备这样的特性.

#### 3.2.1 汶川地震震源区主要的岩石类型

映秀—北川断裂中南段表现为元古界彭灌杂岩和下震旦统变质岩向南东逆冲于上三叠统须家河组

炭质泥岩和煤系地层之上;北段表现为上古生界中-下三叠统向南东逆冲于上三叠统须家河组之上.在断裂的北西盘是由茂县群浅变质岩(千枚岩、绿泥片岩等)及前震旦系杂岩体(彭灌杂岩和宝兴杂岩)组成的映秀—北川推覆体,在断裂南东盘以上三叠统须家河组为主,在其上面出现众多的上古生界中、下三叠统飞来峰.灌县—江油断裂主要发育于中生代地层中,断裂西北盘的三叠系呈叠瓦状逆冲到东南盘的侏罗系-白垩系上<sup>1)</sup>.上古生界和中生界主要岩石为白云岩、灰岩、砾岩、砂岩、粉砂岩、炭质页岩夹煤层、泥岩、页岩等<sup>1)</sup>.

地球物理剖面<sup>[13~17]</sup>显示,映秀—北川断裂中南段(映秀附近)在  $8 \sim 18$  km 的深度范围内,给出的 P 波速度在  $6.0 \sim 6.2$  km/s,根据高温高压波速实验,该波速应该是花岗岩-花岗片麻岩,与彭灌杂岩的主体岩石类似;而映秀—北川断裂北段(北川附近),在  $4 \sim 18$  km 的深度范围内,给出的 P 波速度在  $5.9 \sim 6.1$  km/s,根据高温高压波速实验,该波速应该是浅变质杂岩.

地质和地球物理资料以及地表破裂<sup>[1~3,32]</sup>、地震破裂过程<sup>[1~3,5]</sup>、余震分布等<sup>[21~24]</sup>都显示龙门山构造带具有明显的南北分段特征.5.12 汶川地震的震源位于龙门山构造带的中南段彭灌杂岩体之中,彭灌杂岩是由中酸性的岩浆岩和变质岩混在一起的复合体,主要有闪长岩、花岗岩、混合岩、片麻岩等,主要组成矿物是石英和长石、角闪石和云母等,其中,斜长花岗岩、钾长花岗岩和二长花岗岩出露的最多也最典型<sup>[33~35]</sup>.

#### 3.2.2 高温高压条件下花岗质岩石的破裂强度和黏滑特征

采用居庸关花岗岩进行的岩石破裂实验结果表明<sup>[36]</sup>,花岗岩的剪切破裂强度和摩擦强度都特别大,不容易发生破裂和滑动,除非在岩石中积累非常高的差应力(图 3a).当应力达到其破裂强度或摩擦强度,在瞬时释放出巨大的弹性应变能,从而形成大的黏滑(大地震)(图 3a).由于在一次破裂或摩擦滑动后,应力加载到新的断层摩擦极限强度需要比较长的时间,因此,在这种强度很大的花岗岩质体中发生黏滑(地震)的周期需要很长时间.在每次加载后达到主破裂前,就开始出现小破裂和声发射(小地震)事件,在主破裂或黏滑发生时,都伴有大的声发

1)林茂炳等.龙门山地区地质考察指南,1997

射(大地震)事件,在应力完全释放后,声发射(地震)也随之消失(图 3b).

在彭灌杂岩中,多数花岗岩的斜长石和钾长石呈自形-半自形板状,石英呈半自形-它形<sup>[34,35]</sup>.在相同围压和应变速率等条件下,含自形-半自形板状长石的花岗岩比含它形长石的花岗岩强度要高得多(图 4a),西藏二长花岗岩在 700~800°C 时的强度大于居庸关花岗岩在室温时的强度,而且脆塑性转化的温度(850~900°C)也高于其他花岗岩的温度(400~700°C).

在温度和压力同时改变以模拟地壳不同深度温压条件的实验中<sup>[36]</sup>,在相当于 15~25 km 深度的温压条件下花岗岩仍然具有很高的强度(图 4b).在石英和花岗岩断层摩擦实验中<sup>[36~42]</sup>,断层不稳定滑动向稳定滑动转化的温度为 350°C,这一温度在龙门山地区相当于 18~20 km(根据龙门山地区的热流

值估计).

虽然实验室给定的温度和压力条件不能完全等同于实际地壳的温压条件,但花岗岩的破裂和摩擦实验结果、以及龙门山构造带的地壳流变结构(图 1b)都表明,花岗质岩石在 10~20 km 的深度条件下不仅具备高的破裂和摩擦强度,而且断层处于黏滑的深度范围.

### 3.2.3 岩石强度对断层扩展的控制作用

与花岗岩相反,古生界和中生界的浅变质岩和沉积岩的破裂强度和摩擦强度比彭灌杂岩低得多,在浅表不具备形成强震的力学条件,而在深部这些岩石以塑性变形为主.因此,当断裂在高强度的彭灌杂岩发生错动后,映秀-北川断层中北段 0~4 km 的沉积岩和 4~18 km 深度范围内相对软弱的浅变质岩(破裂强度和摩擦强度都小于花岗岩)在瞬间被切穿<sup>[28]</sup>,断层向北扩展超过 240 km.而震源以南是

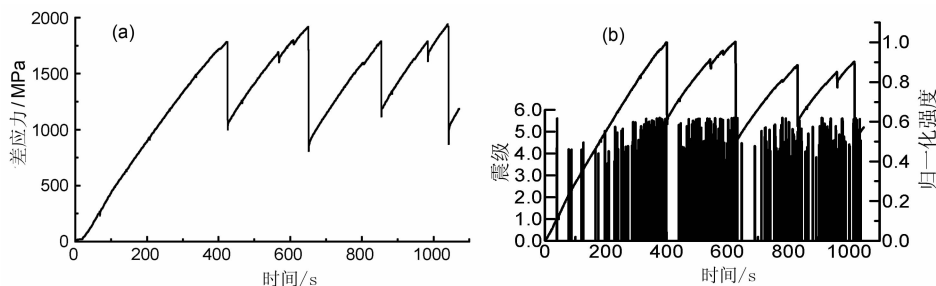


图 3 花岗岩的破裂-黏滑实验结果<sup>[36]</sup>

(a) 实验的应力-时间曲线(围压 400 MPa, 室温); (b) 破裂-黏滑过程中的声发射特征(围压 500 MPa, 室温).

Fig. 3 The experimental results of fracture and stick-slip of granite<sup>[36]</sup>

(a) Stress versus time (confining pressure 400 MPa, room temperature); (b) Acoustic emission during fracture and stick-slip of granite (confining pressure 500 MPa, room temperature).

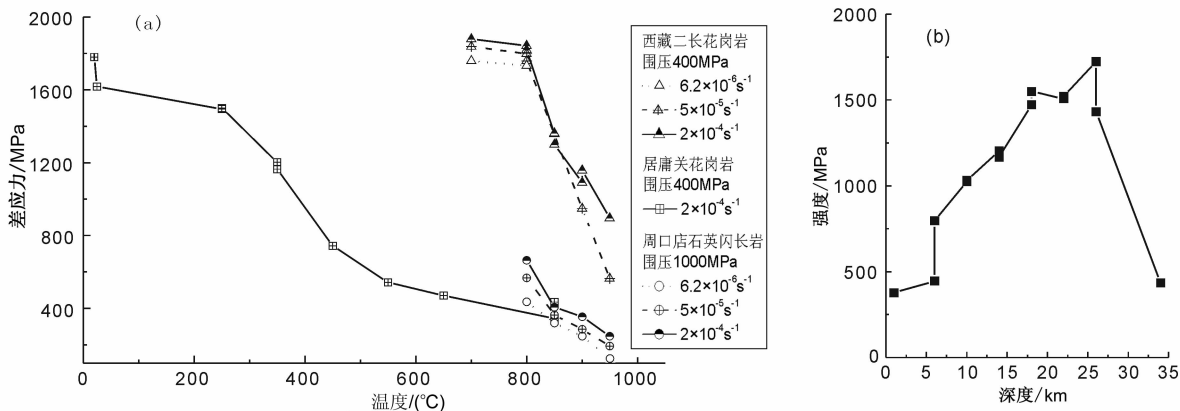


图 4 花岗岩的强度特征

(a) 含自形-半自形板状长石的西藏二长花岗岩破裂强度高于含它形长石的居庸关花岗岩和周口店石英闪长岩的破裂强度; (b) 在相当于 15~25 km 深度的温压条件下花岗岩具有很高的强度.

Fig. 4 The fracture strength of granite

(a) The fracture strength of Tibetan adamellite with euhedral to subhedral feldspar is higher than that of Juyunguan granite and Zhoukou diorite with anhedral feldspar; (b) Strength of granite is still very high at temperature and pressure corresponding to depth of 15~25 km.

与彭灌杂岩强度同样高的宝兴杂岩,它抑制了地震断层向南的扩展.由于断层在错动过程中总是选择从最软弱的岩石中穿过,汶川地震形成的两条地表破裂带与两条主断层的位置不重合,而是沿着软弱岩石分布<sup>[32]</sup>,地表破裂与主断裂在平面上的距离达数十米到数百米不等.其中,映秀—北川地震破裂中南段不是沿主断裂元古界彭灌杂岩和下震旦统与上三叠统须家河组边界分布,而是穿过上三叠统须家河组炭质泥岩和煤系地层<sup>[32]</sup>及其覆盖层晚更新世—全新世残积、坡积砂砾、砂质土层;地表破裂北段也不是沿主断裂上古生界和中下三叠统与上三叠统须家河组边界分布,而是穿过寒武系和奥陶系炭质千枚岩及其覆盖层晚更新世—全新世残积、坡积砂砾、砂质土层;灌县—江油地表破裂也没有与灌县—江油断裂(三叠系和侏罗系—白垩系的分界)重合,而是穿过上三叠统须家河组炭质泥岩和煤系地层<sup>[32]</sup>及其覆盖层晚更新世—全新世残积、坡积砂砾、砂质土层.显然,寒武系和奥陶系炭质千枚岩与上三叠统须家河组炭质泥岩和煤系地层的破裂强度比映秀—北川断裂与灌县—江油断裂的摩擦强度要小.

### 3.3 断层带的摩擦系数

实验研究表明(图5),石英和花岗岩<sup>[37~42]</sup>、辉长岩、长石、辉石<sup>[43~46]</sup>具有很高的摩擦系数,平均在

0.65~0.75之间,其中石英和花岗岩在含水条件下摩擦系数略有所降低,而辉长岩、辉石、长石的摩擦系数在含水条件与高温条件下变化不明显.断层泥中随云母或粘土矿物含量增加,断层摩擦系数迅速降低,多数摩擦系数在0.2~0.5之间<sup>[47~52]</sup>.

断层构造岩研究发现<sup>[53~56]</sup>,在断层带内,通过水-岩反应会产生大量低摩擦系数的矿物,如橄榄石变成蛇纹石与滑石;辉石变成角闪石、绿泥石、阳起石等;长石变成石英+云母+角闪石+绿帘石等,断层就会被弱化,其摩擦强度大幅度降低.如果逆断层某一深度段存在水-岩反应生成的蛇纹石、云母、粘土矿物等构成的低摩擦系数的断层泥,高角度逆断层的强度就会降低,断层就很容易滑动.

龙门山断层带深部是否存在这样的物质条件?根据龙门山断层带的低滑动速率、汶川地震的高能量释放和地震复发周期长<sup>[2,3,28]</sup>的观察事实,我们推测汶川地震的发震断层的摩擦系数相对比较高,否则,断层相对容易滑动,无法积累如此高的能量.

但是,在映秀—北川断裂的白水河段,沿断裂带出露有大小不等的透镜体状蛇纹石岩和滑石片岩,透镜体的长轴方向与断裂带走向趋于一致,它们被认为是扬子地台西缘蛇绿岩带的一部分.与这些岩石直接接触的围岩为阳起石-钠长石糜棱岩和绿泥石-

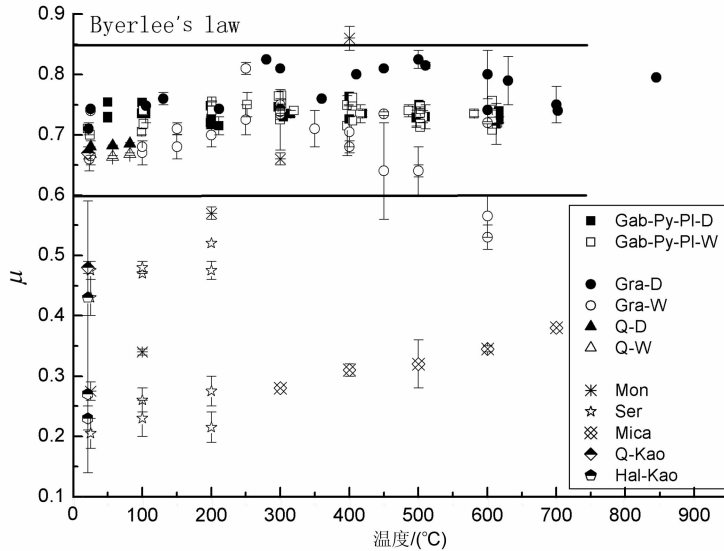


图5 高温高压实验得出的不同矿物和岩石的摩擦系数

图中, Gab-Py-Pl-D 为干的辉长岩、辉石、斜长石<sup>[43,45]</sup>; Gab-Py-Pl-W 为含水辉长岩、辉石、斜长石<sup>[44,46]</sup>; Gra-D 为干的花岗岩<sup>[37,38]</sup>; Gra-W 为含水花岗岩<sup>[41,42]</sup>; Q-D 为干的石英<sup>[39]</sup>; Q-W 为含水石英<sup>[40]</sup>; Mon 为蒙脱石<sup>[47]</sup>; Ser 为蛇纹石<sup>[48]</sup>; Mica 为云母<sup>[52]</sup>; Q-Kao 为石英与高岭石组合<sup>[49~51]</sup>; Hal-Kao 为岩盐与高岭石组合<sup>[49~51]</sup>.

Fig. 5 The friction coefficient of different minerals and rocks from high temperature and pressure experiments

In figure, Gab-Py-Pl-D stands for dry gabbro, pyroxene and plagioclase<sup>[43,45]</sup>; Gab-Py-Pl-W is wet gabbro, pyroxene and plagioclase<sup>[44,46]</sup>; Gra-D is dry granite<sup>[37,38]</sup>; Gra-W is wet granite<sup>[41,42]</sup>; Q-D is dry quartz<sup>[39]</sup>;

Q-W is wet quartz<sup>[40]</sup>; Mon is montmorillonite<sup>[47]</sup>; Ser is serpentine<sup>[48]</sup>; Mica is biotite<sup>[52]</sup>;

Q-Kao is quartz and kaolinite<sup>[49~51]</sup>; Hal-Kao is halite and kaolinite<sup>[49~51]</sup>.

石英片岩、糜棱岩<sup>1)</sup>。这表明在断层局部地段有可能存在低摩擦系数的岩石。因此,通过研究地震破裂带中出露的断层泥、地震深钻可能揭示出的断层岩与断层泥、龙门山构造带中地质历史时期形成的并且已经被抬升剥蚀出露于地表的断层岩与断层泥的成分、结构及其摩擦强度等,可以为这一问题提供有力的实验证据。

### 3.4 高流体压力条件

根据有效应力定律,如果存在非常高的流体压力,流体孔隙压对断层强度有明显的弱化作用。图 6 给出了不同流体压力条件下龙门山构造带的断层摩擦强度与地壳流变结构。与静水压条件(图 6b)相比,流体压力为静水压的 2 倍(图 6a)时,断层的摩擦强度和脆塑性转化域地壳强度都显著降低,而在没有流体压力时(图 6c),断层的摩擦强度和脆塑性转化域地壳强度都相当高。

高倾角的逆断层发生强震,不仅需要非常高的构造差应力,而且要求在地震成核时岩石中流体压力等于或大于静岩压力<sup>[3,28,57,58]</sup>,以触发断层突然滑动。如果地壳中存在饱和水条件,流体压力就可以达到静岩压力<sup>[59,60]</sup>。龙门山构造带是否存在如此高的流体压力? 根据油气勘探资料<sup>[61,62]</sup>,在川西坳陷中的流体压力系数达到 1.8~2.2 倍(相当于静水压的 1.8~2.2 倍)。由此推测,汶川地震区可能具备高流体压力的条件,这为高倾角的逆断层滑动提供了可能性。高压流体存在的直接证据是断层带内花岗质岩石中的主要矿物斜长石、钾长石等与水反应,生成富含水的矿物白云母、绿泥石、绿帘石等<sup>[53,55,56]</sup>,以及石英、长石中富含流体包裹体;如果断层带中缺

少流体,含水矿物会发生脱水变质反应,生成长石等无水矿物。因此,通过研究龙门山断层带构造岩的变形组构、流体包裹体、矿物成分和结构水、孔隙度和渗透率等的变化,结合高流体条件下开展高温高压岩石物理力学实验,可以为高压流体存在与否提供可靠的证据。

断层长期摩擦滑动导致断层带内的物质粒度变细,形成低孔隙断层岩,因此,断层带中的裂隙是流体渗流的主要通道,裂隙的渗透率决定了断层带流体的压力。断层带中存在高流体压力需要断层有特殊的封闭水的机制——断层裂隙愈合。对断层带构造岩研究表明,断层带不同的变形域(不同深度),断层愈合的机制有差别。地震后,脆性域的断层及其周围岩石裂隙张开,地震前积累的高流体压力转变为静水压。随着流体高压消失,流体向上排出,原先溶解于高压流体中的矿物质(岩盐、方解石、石英等)在裂隙中析出结晶,形成脉体,愈合了断层带中的裂隙<sup>[3,28,56,63~65]</sup>;而在脆塑性转化域,断层带中的碎裂的长石发生水解反应,生成的含水矿物绿泥石、绿帘石、白云母等逐渐愈合了断层<sup>[55,56,63,65]</sup>。在塑性变形域,断层带愈合主要通过变形引起石英的压溶、沉淀作用<sup>[3,28,66,67]</sup>实现。

在间震期,随着断层的愈合,以及变形引起矿物中结构水的脱出<sup>[68]</sup>,断层带中的流体压力和断层强度又开始逐渐积累,当差应力和流体压力积累再次达到一定的阈值时,断层突然错动<sup>[3,28,57,58]</sup>,发生新的大地震。

流体中的矿物质结晶作用、压溶作用和矿物反应进行得非常缓慢,对断层的愈合作用需要很长时

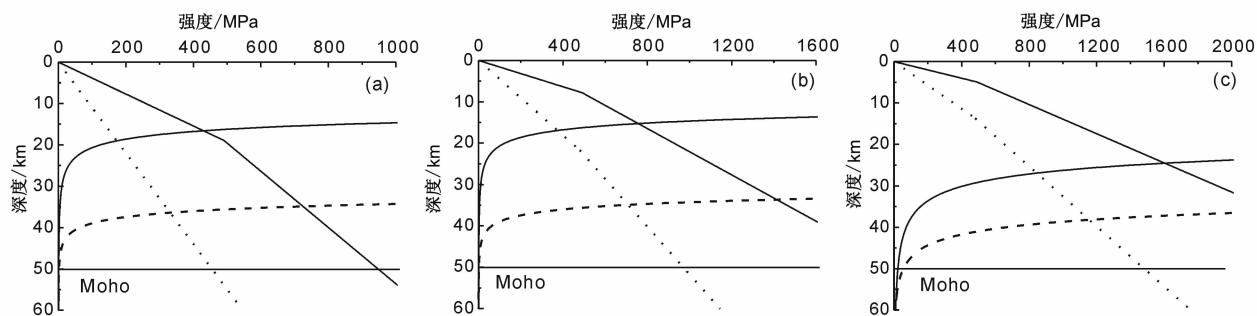


图 6 不同流体压力条件下龙门山构造带的地壳流变结构

(a) 流体压力为 2 倍静水压; (b) 流体压力为静水压; (c) 流体压力为零。

图中的直线是断层摩擦强度(虚线和实线分别是走滑和逆冲断层); 曲线是岩石的流变强度(实线和虚线分别代表长英质岩石和基性岩)。

Fig. 6 The rheological structure of Longmenshan tectonic zone under different fluid pressure condition

(a) Fluid pressure is 2 times of hydrostatic pressure; (b) Fluid pressure is hydrostatic pressure; (c) No any fluid pressure.

In figures, lines stand for strength of fault friction (solid line is strike slip fault, dash line is strike slip-reverse fault), curves stand for rheological strength of rocks (solid curve stands for felsic rock, and dash curve for mafic rock).

间,至少在千年量级,所以一次大地震发生后,高差应力条件和岩石中高流体压力的重建都需要很长时间<sup>[3,28]</sup>,这就是大地震复发周期长的原因。

## 4 结 论

川西高原和龙门山构造带的地壳流变结构中存在多个塑性流变层,而四川盆地地壳基本没有出现塑性流变层。这种复杂的流变结构加速了川滇地区的多条左行断层及其之间的块体向东南运动,而具有右行兼逆冲特征的龙门山断层带基本处于闭锁状态。应力在长期缓慢积累中达到地壳的极限强度时,断层突然发生滑动,形成 5.12 汶川 8.0 级地震。

导致汶川地震高角度逆断层滑动和地震强度大的原因有:(1)二长花岗岩为代表的震源区岩石具有很高的破裂强度和摩擦强度,能够承受极大的差应力和积累巨大的能量;(2)龙门山断层带内可能存在比较高的流体压力。龙门山断层带的低滑动速率、汶川地震高能量释放和地震复发周期长的观察事实显示,龙门山断层带整体的摩擦系数比较高,但不排除局部段存在低摩擦系数的岩石。

**致 谢** 感谢朱艾澜提供了小震定位数据;靖晨和兰彩云协助整理摩擦实验资料。在论文写作过程中与陈九辉、王萍进行了多次有益的讨论,张培震研究员为本文提出了非常中肯的建议,特此致谢!感谢评审专家提出的合理化建议。

## 参考文献(References)

[1] 徐锡伟,闻学泽,叶建青等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 2008, **30**(3):597~629  
Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The Ms8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3):597~629

[2] 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. 地球物理学报, 2008, **51**(4):1066~1073  
Zhang P Z, Xu X W, Wen X Z, et al. Slip rates and recurrence intervals of the Longmen Shan active fault zone, and tectonic implications for the mechanism of the May12 Wenchuan earthquake, 2008, Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(4):1066~1073

[3] Xu Z Q, Ji S C, Li H B, et al. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake. *Episodes*, 2008, **31**(3): 291~301

[4] 何宏林,孙昭民,魏占玉等. 汶川 Ms8.0 地震地表破裂带白沙河段破裂及其位移特征. 地震地质, 2008, **30**(3):658~673

He H L, Sun Z M, Wei Z Y, et al. Rupture of the Ms8.0 Wenchuan earthquake along Baishuihe river. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3):658~673

[5] Burchfiel B C, Royden L H, van der Hilst R D, et al. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 2008, **18**(7), doi: 10.1130/GSATG18A.1

[6] 刘 静,张智慧,文力等. 汶川 8 级大地震同震破裂的特殊性及构造意义—多条平行断裂同时活动的反序型逆冲地震事件. 地质学报, 2008, **82**(12):1707~1722  
Liu J, Zhang Z H, Wen L, et al. The Ms8.0 Wenchuan earthquake coseismic rupture and its tectonic implications — An out of sequence thrusting event with slip partitioned on multiple faults. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, **82**(12):1707~1722

[7] Brace W T, Kohlstedt D L. Limits on lithospheric stress imposed by laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 1980, (85):6248~6252

[8] Scholz C H. The brittle-plastic transition and depth of seismic faulting. *Geol. Rund.*, 1988(77): 319~328

[9] Kohlstedt D L, Evans B, Mackwell S J. Strength of the lithosphere: constraints imposed by laboratory experiments. *J. Geophys. Res.*, 1995(100): 17587~17602

[10] Chen W P, Molnar P. Focal depths of intracontinental and intraplate earthquake and their relation for thermal and mechanical properties of the lithosphere. *J. Geophys. Res.*, 1983(88): 4183~4214

[11] 周永胜,何昌荣. 地壳主要岩石流变参数及华北地壳流变性质研究. 地震地质, 2003, **25**(1):109~122  
Zhou Y S, He C R. Rheological parameter of crustal rocks and crustal rheology of North China. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2003, **25**(1): 109~122

[12] Ma K F, Teh-Ru, Alex Song. Thermo-mechanical structure beneath the young orogenic belt of Taiwan. *Tectonophysics*, 2004, **388**:21~31

[13] 熊绍柏,滕吉文,尹周勋等. 攀西构造带南部地壳与上地幔结构的爆炸地震研究. 地球物理学报, 1986, **29**(3): 235~244  
Xiong S B, Teng J W, Yin Z X, et al. Explosion seismological study of the structure of the crust and upper mantle at southern part of the Panxi tectonic belt. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1986, **29**(3):235~244

[14] 赵 珠,张润生. 四川地区地壳上地幔速度结构的初步研究. 地震学报, 1987, **9**(2):154~166  
Zhao Z, Zhang R S. Primary study of crustal and upper mantle velocity structure of Sichuan province. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1987, **9**(2):154~166

[15] 许志琴,侯立玮,王宗秀. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京:地质出版社, 1992. 1~60  
Xu Z Q, Hou L W, Wang Z X. Mountain Building Processes of the Songpan Ganzi Orogeny, China (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992. 1~60

[16] 王椿镛,吴建平,楼 海等. 川西—藏东地区的地壳 P 波速度



- 结构. 中国科学(D辑), 2003, **33**(增刊): 181~189
- Wang C Y, Wu J P, Lou H, et al. P wave velocity structure in western Sichuan and eastern Tibetan region. *Science in China* (Series D), 2003, **46** (Suppl.): 254~265
- [17] Wang C Y, Han W B, Wu J P, et al. Crustal structure beneath the Eastern margin of the Tibetan plateau and its Tectonic implication. *J. Geophys. Res.*, 2007, **112**, B07307: 1~21
- [18] 何昌荣, 周永胜, 桑祖南. 四川攀枝花辉长岩半脆性-塑性流变的实验研究. 中国科学(D辑), 2002, **32**(9): 717~726  
He C R, Zhou Y S, Sang Z N. An experimental study on semi-brittle and plastic rheology of Panzhihua gabbro. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2002, **32**(9): 717~726
- [19] 朱艾澜, 徐锡伟, 周永胜. 川西地区小震重新定位及其活动构造意义. 地球物理学报, 2005, **48**(3): 629~636  
Zhu A L, Xu X W, Zhou Y S, et al. Relocation of small earthquakes in western Sichuan, China and its implications for active tectonics. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(3): 629~636
- [20] 张瑞青, 吴庆举, 李永华等. 汶川中强余震震源深度的确定及其意义. 中国科学(D辑), 2008, **38**(10): 1234~1241  
Zhang R Q, Wu Q J, Li Y H, et al. Focal depths for moderate-sized aftershocks of the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake and their implications. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, **38**(10): 1234~1241
- [21] 朱艾澜, 徐锡伟, 刁桂苓等. 汶川  $M_s$ 8.0 地震部分余震重新定位及地震构造初步分析. 地震地质, 2008, **30**(3): 759~767.  
Zhu A L, Xu X W, Diao G L, et al. Relocation of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake sequence in part: preliminary seismotectonic analysis. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(3): 759~767
- [22] 黄媛, 吴建平, 张天中等. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究. 中国科学(D辑), 2008, **38**(10): 1242~1249  
Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. Relocation of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2008, **38**(10): 1242~1249
- [23] 吕坚, 苏金蓉, 靳玉科等. 汶川 8.0 级地震序列重新定位及其发震构造初探. 地震地质, 2008, **30**(4): 917~925.  
Lü J, Su J R, Jin Y K, et al. Discussion on relocation and seismo-tectonics of the  $M_s$ 8.0 Wenchuan earthquake sequences. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2008, **30**(4): 917~925
- [24] 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 汶川  $M_s$ 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究. 地球物理学报, 2009, **52**(2):  
Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. Seismotectonics study by relocation of the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake sequence. *Chinese J Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(2)
- [25] 张培震, 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2008, **38**(9): 1041~1056  
Zhang P Z. The tectonic deformation, strain distributions and deep dynamics process of western Sichuan areas in eastern of Tibet. *Science in China* (Series D), 2008, **38**(9): 1041~1056
- [26] 许志琴, 李化启, 侯立玮等. 青藏高原东缘龙门山-锦屏造山带的崛起!! 大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 2007, **26**(10): 1262~1276  
Xu Z Q, Li H Q, Hou L W, et al. Uplifting of Longmen Shan and Jinping Shan, eastern margin of the Tibetan Plateau: large scale detachment faults and their extrusion. *Mechanism* (in Chinese), 2007, **26**(10): 1262~1276
- [27] Bai D H, Meju M A, Unsworth M J, et al. Electromagnetic evidence for crust flows beneath Tibetan Plateau and its Significance to the  $M_s$ 8.0 earthquake in Wenchuan, China. *Science*, 2009, in Press
- [28] 稽少丞, 许志琴, 王茜等. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动. 地质学报, 2008, **82**(12): 1643~1667  
Ji S C, Xu Z Q, Wang Q, et al. Continental extrusion and seismicity in China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2008, **82**(12): 1643~1667
- [29] 滕吉文, 白登海, 杨辉等. 2008 汶川  $M_s$ 8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. 地球物理学报, 2008, **51**(5): 1385~1402  
Teng J W, Bai D H, Yang H, et al. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake of 2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(5): 1385~1402
- [30] Wintsch R P. Blastocataclasite. A possible rock type from the bottom of the seismic zone. In: Snoke A W, Tullis J, V R Todd eds. *Fault Related Rocks: A Photographic Atlas*, 1998. 454~455
- [31] Wintsch R P. Strengthening of fault breccia by K-feldspar cementation. In: Snoke A W, Tullis J, Todd V R eds. *Fault Related Rocks: A Photographic Atlas*, 1998. 42~4
- [32] 王萍, 付碧宏, 张斌等. 汶川 8.0 级地震地表破裂带与岩性关系. 地球物理学报, 2009, **52**(1): 131~139  
Wang P, Fu B H, Zhang B, et al. Relationships between surface ruptures and lithologic characteristics of the Wenchuan  $M_s$ 8.0 earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(1): 131~139
- [33] 四川省地矿局. 四川区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991  
Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. *Regional Geology of Sichuan Province* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1991
- [34] 邓江红. 龙门山中段映秀地区花岗岩单元特征. 成都理工大学学报, 1994, **21**(3): 29~38  
Deng J H. Characteristics of granite units in Yingxiu region, Longmen Mountains. *Journal of Chengdu Institute of Technology* (in Chinese), 1994, **21**(3): 29~38
- [35] 张沛, 周祖翼, 许长海等. 川西龙门山山灌杂岩地球化学特征: 岩石成因与构造意义. 大地构造与成矿学, 2008, **32**(1): 105~116  
Zhang P, Zhou Z Y, Xu C H, et al. Geochemistry of Pengguan complex in the Longmen shan region, western Sichuan Province, China: petrogenesis and tectonic implications.

- Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 2008, **32**(1): 105~116
- [36] 周永胜, 张流, 蒋海昆等. 不同温压条件下居庸关花岗岩变形破坏与失稳形式的实验研究. *中国地震*, 2002, **18**(4): 389~400  
Zhou Y S, Zhang L, Jiang H K, et al. Experiments of brittle-plastic transition and instability modes of Juyongguan granite at different temperature and pressure. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 2002, **18**(4): 389~400
- [37] Stesky R M, Brace W F, Riley D K, et al. Friction in faulted rock at high temperature and pressure. *Tectonophysics*, 1974, **23**: 177~203
- [38] Lockner D A, Summers R, Byerlee J D. Effects of temperature and sliding rate on frictional strength of granite. *Pure Applied Geophysics*, 1986, **124**: 445~469
- [39] Chester F M, Higgs N G. Multimechanism friction constitutive model for ultrafine quartz gouge at hypocentral conditions. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 1859~1870
- [40] Chester F M. Effects of temperature on friction; constitutive equations and experiments with quartz gouge. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**: 7247~7261
- [41] Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. Fault stability inferred from granite sliding experiments at hydrothermal conditions. *Geophysical Research Letters*, 1991, **18**: 609~612
- [42] Blanpied M L, Lockner D A, Byerlee J D. Frictional slip of granite at hydrothermal conditions. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 13045~13064
- [43] He C, Wang Z, Yao W. Frictional sliding of gabbro gouge under hydrothermal conditions. *Tectonophysics*, 2007, **445**: 353~362
- [44] He C, Yao W, Wang Z, et al. Strength and stability of frictional sliding of gabbrogouge at elevated temperatures. *Tectonophysics*, 2006, **427**: 217~229
- [45] 谭文彬, 何昌荣. 高温高压及干燥条件下斜长石和辉石断层泥的摩擦滑动研究. *地学前缘*, 2008, **15**(3): 279~286  
Tan W B, He C R. Frictional sliding of pyroxene and plagioclase gouges in gabbro under elevated temperature and dry condition. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, **15**(3): 279~286
- [46] 罗丽, 何昌荣. 热水条件下斜长石和辉石断层泥的摩擦滑动研究. *地震地质*, 2009, **31**(1), 出版中  
Luo L, He C R. Frictional sliding of pyroxene and plagioclase gouges in gabbro under hydrothermal conditions. *Seismology and Geology* (in Chinese), 2009, **31**(1) (in Press)
- [47] 马胜利, 嶋本利彦. 蒙脱石的脱水作用对断层摩擦本构行为的影响. *地震地质*, 1995, **17**(4): 289~303  
Ma S L, T Shimamoto. Effect of dehydration of montmorillonite on constitutive behavior of friction. *Seismology and Geology* (in Chinese), 1995, **17**(4): 289~303
- [48] Moore D E, Lockner D A, Ma S L, et al. Strengths of serpentinite gouges at elevated temperatures. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(B7): 14787~14801
- [49] Bos C J, Spiers C J. Frictional-viscous flow of simulated fault gouge caused by the combined effects of phyllosilicates and pressure solution. *Tectonophysics*, 2000, **327**: 173~194
- [50] Bos B, Spiers C J. Effect of phyllosilicates on fluid-assisted healing of gouge-bearing faults. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, **184**: 199~210
- [51] Bos B, Spiers C J. Frictional-viscous flow of phyllosilicate-bearing fault rock: microphysical model and implications for crustal strength profiles. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(B2), 10.1029/2001JB000301
- [52] Mariani E, K H Brodie, E H Rutter. Experimental deformation of muscovite shear zones at high temperatures under hydrothermal conditions and the strength of phyllosilicate-bearing faults in nature. *Journal of Structural Geology*, 2006, **28**: 1569~1587
- [53] Wintsch R P, Christoffersen R, Kronenberg A K. Fluid-rock reaction weakening in fault zones. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 13021~13032
- [54] Nugent M A, Brantley S L, Pantano C G, et al. The influence of natural mineral coatings on feldspar weathering. *Nature*, 1996, **396**: 527~622
- [55] Yonkee W A, Parry W T, Bruhn R L. Relations between progressive deformation and fluid-rock interaction during shear-zone growth in a basement-cored thrust sheet, Sevier orogenic belt, Utah. *American Journal of Science*, 2003, **303**: 1~59
- [56] Whitmeyer S J, Wintsch R P. Reaction localization and softening of texturally hardened mylonites in a reactivated fault zone, central Argentina. *J. Meta. Geology*, 2005, **23**(6): 411~424
- [57] Sibson R H, Robert F, Poulsen H. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits. *Geology*, 1988, **16**: 551~555
- [58] Sibson R H. Implications of fault-valve behavior for rapture nucleation and recurrence. *Tectonophysics*, 1992, **211**: 283~293
- [59] Yardley B W D, Valley J W. How wet is the Earth's crust? *Nature*, 1994, **371**(15): 205~206
- [60] Yardley B W D, Valley J W. The petrologic case for a dry lower crust. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(B6): 12173~12185
- [61] 王震亮, 孙明亮, 张立宽等. 川西地区须家河组异常压力演化与天然气成藏模式. *地球科学—中国地质大学学报*, 2004, **29**(4): 434~439  
Wang Z L, Sun M L, Zhang L K, et al. Evolution of abnormal pressure and model of gas accumulation in Xujiahe formation, western Sichuan basin. *Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2004, **29**(4): 434~439
- [62] 张金川, 刘丽芳, 唐玄等. 川西拗陷根缘气藏异常地层压力. *地学前缘*, 2008, **15**(2): 147~155  
Zhang J C, Liu L F, Tang X, et al. Abnormal pressure in

- the source-contacting gas reservoir in western Sichuan basin. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, **15**(2):147~155
- [63] Wintsch R P, Kvale C M, Kisch H J. Open system, constant volume development of slaty cleavage, and strain induced replacement reactions in the Martinsburg Formation, Lehigh Gap, PA. *Geological Soc. Am. Bull.*, 1991, **103**:916~927
- [64] Brantley S L, Evans B, Hickman S H, et al. Healing of microcracks in quartz: implications for fluid flow. *Geology*, 1990, **18**:136~139
- [65] Moore J C, Saffer D. The up dip limit of the seismogenic zone in the accretionary prism of SW Japan: an effect of diagenetic/low grade metamorphic processes and declining fluid pressure. *Geology*, 2001, **29**:183~186
- [66] Wintsch R P, Keewook Y. Dissolution and replacement creep: a significant deformation mechanism in mid-crustal rocks. *J. Struct. Geol.*, 2002, **24**:1179~1193
- [67] Gratier J P, Favreau P, Renard F. Modeling fluid transfer along California faults when integrating pressure solution crack sealing and compaction processes. *J. Geophys. Res.*, 2001, **108**(B2): 2104, doi:10.1029/2001JB000380
- [68] 周永胜,何昌荣,杨晓松. 中地壳韧性剪切带中的水与变形机制. *中国科学*, 2008, **38**(7):819~832  
Zhou Y S, He C R, Yang X S. Water contents and deformation mechanism in ductile shear zone of middle crust along the Red River fault in southwestern China. *Science in China (Ser. D)* (in Chinese), **38**(7):819~832

(本文编辑 何 燕)