

汶川地震断裂带科学钻探 1 号井 (WFSD-1) 非弹性应变恢复法 (ASR 法) 三维地应力测试与“5.12”汶川地震的形成机制*

崔军文¹ 李宗凡² 王连捷³ 林为人⁴ 王薇³ 孙东生³ 高禄⁵ 钱华山⁶

CUI JunWen¹, LI ZongFan², WANG LianJie³, LIN WeiRen⁴, WANG Wei³, SUN DongSheng³, GAO Lu⁵ and QIAN HuaShan⁶

1. 大陆构造和动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

2. 四川省区域地质调查队, 成都 610213

3. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081

4. Koch Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Nankoku

5. 中国地质大学, 北京 100083

6. 北京超算科技有限公司, 北京 100083

1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Regional Geological Survey Party of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

3. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

4. Kochi Institute for Core Sample Research, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Nankoku 783-8502, Japan

5. China University of Geosciences, Beijing 100081, China

6. Beijing Supcompute Com., Beijing 100083, China

2013-04-01 收稿, 2013-05-30 改回.

Cui JW, Li ZF, Wang LJ, Lin WR, Wang W, Sun DS, Gao L and Qian HS. 2013. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery (ASR) of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1) and formation mechanism of the “5.12” Wenchuan Earthquake. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6):2033–2047

Abstract The stress existing in the crustal rock mass is called in-situ stress. The ASR (short for anelastic strain recovery) technique is widely used in deep 3-D stress measurements of rocks in crustal drilling, especially in seismic fracture zones with complex geologic conditions and broken formations. The 3-D ASR measurement results of the well WFSD-1 show that there are major differences between the Longmenshan foreland obduction zone and its underlying Longmenshan foreland basin and overlying Songpan-Garzê block in terms of structure and stress state. On the whole, during the Wenchuan Earthquake, the Longmenshan foreland obduction zone displayed SW to NE “laminar” flow of deep materials along the inter-crustal detached layer, and then turned into rapid vertical extrusion along the Yingxiu-Beichuan fault in the upper crust; while the Songpan-Garzê block on its west side showed SE to NW gravitational slipping, and the Longmenshan foreland basin on its east side showed NE to SW strike-slip or dextral rotation. There has not occurred apparent or large-scale intracontinental subduction of the Yangtze block toward the Longmenshan orogenic zone on the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau since the Late Cenozoic. The rapid and vertical up-going flow and extrusion of deep high-temperature low-viscosity materials in the Longmenshan foreland obduction zone is the direct cause for the occurrence of the May-12 Wenchuan Earthquake, while the intensive compression and crustal thickening of the Longmenshan foreland area as well as accumulation of deep stress and seismic energy as a result of E-trending expansion of the Songpan-Garzê block are the main cause inducing abrupt change of the deep-seated shift field and rapid vertical extrusion of materials. The latter is the necessary condition for the former and not the direct result. The orientation of the principal compressive stress obtained by the ASR stress measurement is

* 本文受国家科技专项(WFSD)资助。

第一作者简介: 崔军文, 男, 研究员, 构造地质学专业, E-mail: cuijunwen@263.net

exactly parallel to the shift direction of the GPS coseismic velocity field, which indicates that the in-situ stress measured with the ASR technique may actually reflect or most approach the tectonic stress state during the earthquake.

Key words Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1 (WFSD-1); Anelastic strain recovery (ASR) earth stress measurement; Formation mechanism of earthquakes; Thrusting; Dextral strike-slip faulting (or dextral rotary); Normal slipping; Vertical extrusion

摘要 汶川地震断裂带科学钻探1号井(WFSD-1)的ASR三维地应力测试结果表明,龙门山前陆逆冲带与其下伏的龙门山前陆盆地和上覆的松潘-甘孜地块的构造及地应力状态存在有重大差异。从整体上看,在汶川地震中,龙门山前陆逆冲带表现为在强烈的区域性挤压背景下,深部物质沿壳内拆离层自SW向NE方向的“层状”流动,在地壳上部转化为沿映秀-北川断裂(YBF)的快速垂向挤出,而其西侧的松潘-甘孜地块作自SE往NW方向的重力滑覆,东侧的龙门山前陆盆地则表现为自NE往SW方向的走滑或右行旋转。晚新生代以来,扬子地块相对于青藏高原东缘的龙门山造山带并无明显的或大尺度的陆内俯冲作用发生。龙门山前陆逆冲带深部高温低粘度物质垂直向上的、快速的流动和挤出,直接导致了“5.12”汶川地震的发生,而松潘-甘孜地块E向扩展导致龙门山前陆带的强烈挤压和陆壳增厚及深部应力和地震能量的积聚则是诱导深部位移场发生突变和物质快速垂向挤出的主因,E向扩展是深部地震能量积聚和快速垂向挤出作用的必要条件,而非地震发生的直接原因。ASR地应力测试得出的主压应力方向完全平行于GPS同震速度场的位移方向,似乎表明ASR测试获得的原地应力场或许真实地反映了或最接近于地震过程中的构造应力状态。

关键词 汶川地震断裂带科学钻探1号井(WFSD-1);非弹性应变恢复法(ASR法)地应力测试;地震形成机制;逆冲作用;右行走滑作用(或右行旋转);正滑作用;垂向挤出

中图法分类号 P542

1 引言

5.12汶川特大地震固然对我国造成极大的经济损失,但也给我们留下了极为宝贵的科研“财富”,人们在珍惜这次万年不遇的巨大地质灾害所传递的重要构造信息和相关地震资料的同时,不得不思考为什么在普遍认为不具备诱发强烈地震条件的地区会突然爆发震级达 M_s 8.0、最大烈度11的如此强烈的地震。汶川地震位于青藏高原东缘的龙门山地区,震中深度为17~18.8km(USGS, 2008;陈运泰等,2008;陈九辉等,2009),GPS资料揭示该区的东向位移速度很小($<1.5 \sim 1.9$ mm/a)(Chen *et al.*, 2000;张培震等,2002;Burchfiel *et al.*, 2008),而汶川地震同震破裂带的长度却达300km,宽80km(陈运泰,2008;付小芳等,2008;李海兵等,2008;刘静等,2008;嵇少丞等,2008),地震灾害面积达 50×10^4 km²,自2008.5.12至2011.10.19.共发生余震89860次(丁志峰和李丽,2011^①),为什么在地表现今位移速率不大的地区,在深部能集中有如此强大的能量,能量积聚需要什么样的地质条件,其成因机制是什么?汶川地震是多条平行断裂参与的同震破裂逆冲型地震,同震破裂的性质、位移量和宽度等,在时间上和空间上,都存在明显差异(付小芳等,2008;李海兵等,2008;刘静等,2008;嵇少丞等,2008;许志琴等,2008;Xu *et al.*, 2008),同震破裂现象传递的地震动力学过程是什么?地震地质调查还表明,房屋建筑的成层垮塌或消失一般都发生在第二层和第三层(图1a, b),这些现象揭示在地震发生、发展过程中,构造应力场在垂向和横向都是不均一的,其时空变化的规律性是什么?……,这些问题的解决,无疑对地震形成机制的研究和人类为实现地震预报的

努力具有重要意义。因此,汶川地震留给我们的启迪、教训和科学价值是全方位的,是人类不可多得的宝贵遗产。

诱发地震的各种机制中,应力被认为是导致地震发生的最直接的驱动机制(李四光,1977;Zoback and Harjce, 1997;Hung *et al.*, 2009;嵇少丞等,2008;许志琴等,2008),因此在地震研究中,地应力的测试具有不寻常的意义。存在于地壳块体中的应力,在地应力测试中称为原地应力(in situ stress)(Zoback *et al.*, 1985;Barton *et al.*, 1988;Lin *et al.*, 2006),它通过强烈地震活动得到快速释放,并诱发巨大的地震能量和地质灾害,尚留存于岩石块体中的残余应力将通过不同的方式缓慢释放,ASR法获得的地应力场就是反映震后岩石块体中、通过缓慢释放的残余应力场,显然后者与地震活动过程中的应力场存在密切关系。非弹性应变恢复法(THE ANELASTIC STRAIN RECOVERY,简称ASR法)被用于地壳钻孔岩石,特别是地质条件复杂,地层破碎情况下地震断裂带的深部三维地应力测试,它可获得三维地应力的主应力方向和大小(Matsuki, 1991;Matsuki and Takeuchi, 1993;Brudy *et al.*, 1997;Lin, 2007;Lin *et al.*, 2007;Byrne *et al.*, 2009;Wang *et al.*, 2012)。

2 汶川地震的区域构造背景

汶川大地震的震中位于北纬30.96°、东经103.35°(陈九辉等,2009)的四川省汶川县映秀镇西南,该区在构造上属于青藏高原和扬子地块碰撞结合部位的龙门山构造带(许志琴等,1992;崔军文等,2006;Xu *et al.*, 2008)(图2a),其西侧

① 丁志峰,李丽. 2011. 井孔附近微震台阵观测与余震研究



图1 映秀-北川地震断裂带的同震破裂现象

(a)-位于“5.12”汶川地震震中区建筑物和道路的变形。路面的拱起和沉降,相对高差2.5m;位于断裂带上盘的蓝顶房向断层下盘倾斜。汶川映秀;(b)-原6层楼房,2层在地震中整体消失,3层以上楼层相对于1层整体由早期的自NW向SE方向推移(逆冲型剪切)转化为自NE向SW方向的推移(右行走滑型剪切),估算的右行位移量为1.5m。汶川映秀;(c)-映秀-北川断裂破碎带寒武系下统清平组含磷含锰层中的挤压片理,断裂产状: $325^{\circ}\angle 80^{\circ}$,Si-石英岩脉,Ca-方解石脉,Sa-硅质角砾。安县高川乡;(d)-汶川-茂县断裂,南华系变质角砾状凝灰岩中的流劈理,变形角砾的长轴平行流劈理,流劈理产状: $336^{\circ}\angle 60^{\circ}$ 。Si-硅质岩,Sa-变质砂岩,Vr-火山岩角砾。绵竹县渭门乡;(e)-南华系变质角砾状凝灰岩中流劈理面上发育的两期大致平行流劈理倾向的石英擦痕线理, L_1 -早期逆冲型剪切滑动方向(逆冲型擦痕线理), L_2 -晚期正滑型剪切滑动方向(正滑型擦痕线理)。绵竹县渭门乡;(f)-映秀-北川断裂(YBF)上盘彭灌杂岩中的一系列向SE方向倾斜的正滑断裂和构造滑覆体,沿断裂发生强烈岩体崩塌等地质灾害。安县高川乡

Fig.1 Coseismic surface ruptures in the Yingxiu-Beichuan fault zone

(a)-deformation of the buildings and roads in the epicentral area, arch and subsidence of the road, the relative height of 2.5 m; (b)-original six-story building, two layers disappear in the earthquake as a whole, three floors above floor level with respect to a whole by the early passage from NW to SE direction (thrust shear) into the direction from NE to SW over (dextral slip shear), the estimated amount of displacement the right line is 1.5 m. Yingxiu; (c)-compression schistosity of the Lower Cambrian Qingping Formation in the Yingxiu-Beichuan fault zone, fault occurrence: $325^{\circ}\angle 80^{\circ}$, Si-quartzite veins, Ca-calcite veins, Sa-siliceous breccia. Gaochuan Township, Anxian County; (d)-flow cleavage in Late Proterozoic metamorphic brecciated tuff of the Wenchuan-Maoxian fault zone, parallel to the axial plane of the deformed breccia in flow cleavage, flow cleavage occurrence: $336^{\circ}\angle 60^{\circ}$. Si-siliceous rock, Sa-metasandstone, Vr-volcannic rock. Weimen Township, Mianzhu County; (e)-two roughly quartz scratches lineation parallel flow cleavage tendency in Late Proterozoic metamorphic brecciated tuff, L_1 -early thrust shear sliding direction (thrust striation lineation); L_2 -late positive-slip shear sliding direction (positive slip striation lineation). Weimen Township, Mianzhu County; (f)-a series of normal faults and tectonic gliding to the SE direction tilt in Yingxiu-Beichuan fault (YBF) hanger Pengguan complex, strong rock mass collapse occurred geological disasters along the faults. Gaochuan Township, Anxian County

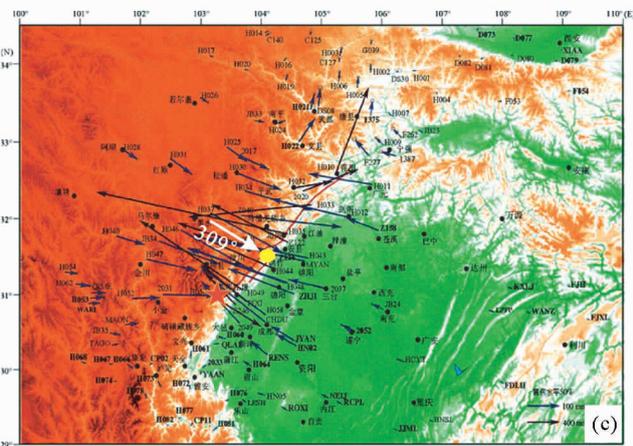
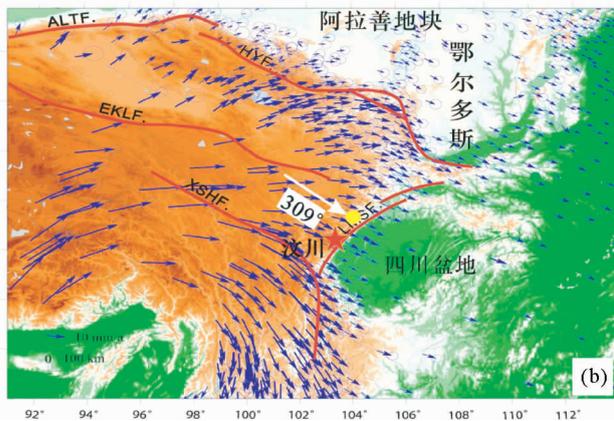
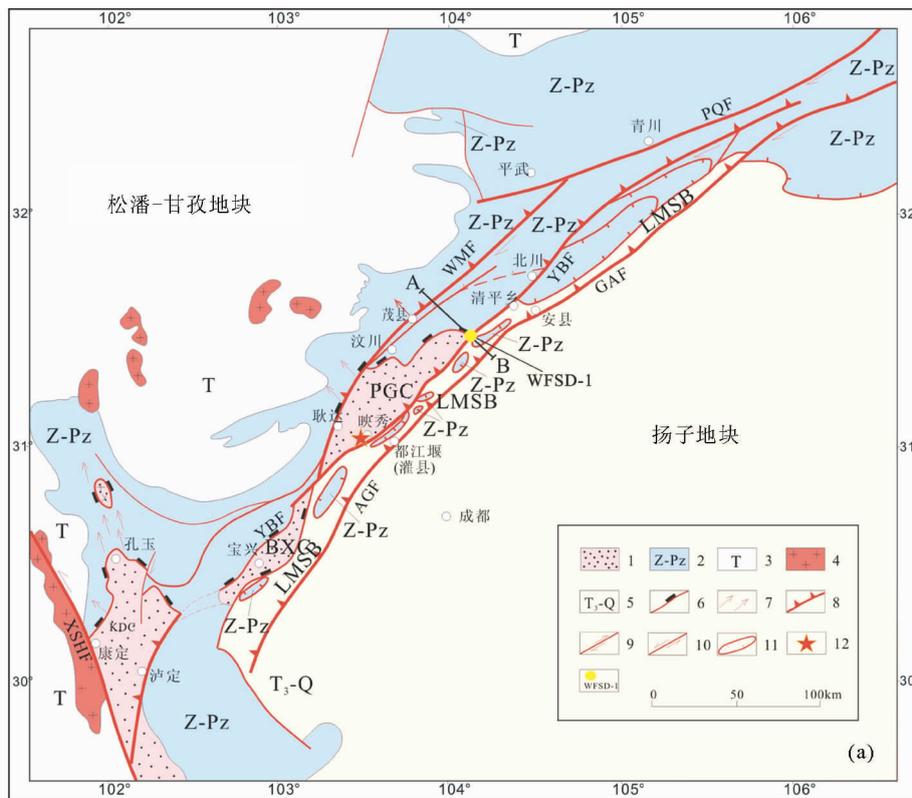


图2 龙门山构造带及其邻区区域构造简图(a, 据许志琴等, 2008; 李海兵等, 2008 改编)、GPS 位移场 (b, 据张培震等, 2002) 和 GPS 同震位移场 (c, 据国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008)

1-龙门山杂岩; 2-震旦系-古生界; 3-三叠系复理石; 4-中生代-新生代花岗岩; 5-上三叠统-第四系; 6-韧性拆离断层; 7-拉伸线理; 8-冲断层; 9-右行走滑断层; 10-左行走滑断层; 11-推覆体; 12-“5.12”地震震中位置. WMF-汶川-茂县断裂; YBF-映秀-北川断裂; GAF-灌县-安县断裂; PQF-平武-青川断裂; XSHF-鲜水河断裂; PGC-彭灌杂岩; BXC-宝兴杂岩; KDC-康定杂岩; LMSB-龙门山前陆盆地; WFSFD-1: 汶川地震断裂带科学钻探1号井

Fig. 2 Sketch of regional structure of the Longmenshan and its adjacent areas (a, modified after Xu *et al.*, 2008; Li *et al.*, 2008), GPS displacement field (b, modified after Zhang *et al.*, 2002) and GPS coseismic displacement field (c, modified after MNSE “CMONC” PG, 2008)

1-Longmenshan complex; 2-Sinian-Paleozoic; 3-Triassic flysch; 4-Meso-Cenozoic granite; 5-Upper Triassic-Quaternary; 6-ductile detachment fault; 7-stretched lineation; 8-thrust fault; 9-dextral strike-slip fault; 10-sinistral strike-slip fault; 11-nappe; 12-epicenter location of the May 12 earthquake. WMF-Wenchuan-Maoxian fault; YBF-Yingxiu-Beichuan fault; GAF-Guanxian-Anxian fault; PQF-Pingwu-Qingchuan fault; XSHF-Xianshuihe fault; PGC-Pengguan complex; BXC-Baoxing complex; KDC-Kangding complex; LMSB-Longmenshan foreland basin; WFSFD-1: Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Hole-1

为松潘-甘孜印支造山带,东侧为扬子地块西缘的龙门山前陆盆地。龙门山构造带的主体为龙门山前陆逆冲断裂带,它由汶川-茂县断裂(后龙门山断裂)、映秀-北川断裂(龙门山中央断裂)、灌县-安县断裂(龙门山山前断裂)和平武-青川断裂等4条逆冲断裂及夹持其间的构造岩片组成(许志琴等,1992,2007;刘树根等,1995),其南段被鲜水河左行走滑断裂错断(图2a)。构成龙门山造山带主体的岩石类型为龙门山-锦屏山前震旦纪变质杂岩(龙门山杂岩),后者自北而南有彭灌杂岩、宝兴杂岩、康定杂岩,呈断片状,杂岩体的东界为映秀-北川逆冲断裂(图2a),西界为汶川-茂县断裂(许志琴等,2007)。映秀-北川断裂,强烈流劈理化(图1c),流劈理面上普遍发育逆冲型拉伸线理被右行走滑型拉伸线理切割的叠加应变现象,显示其早期逆冲和后期右行走滑特点,即龙门山逆冲叠覆体相对其东侧的扬子地块(四川盆地)自SW向NE方向斜冲。汶川-茂县断裂(WMF)的面理倾向北西,中等-高角度倾斜(图1d),面理上发育向北西-北西西方向侧伏的、近于平行的逆冲型和正滑型两期拉伸线理(图1e),前者早于后者,显示汶川-茂县断裂早期具逆冲性质,后期具正滑性质。龙门山前陆逆冲带的运动学特征整体上表现为:在晚三叠世-白垩纪时期龙门山前陆逆冲叠覆体整体由NW向SE推挤,同时向NE方向斜冲,造成YBF的强烈挤压、逆冲和右行走滑作用及龙门山山体的垂向挤出,龙门山前陆逆冲带后缘的汶川-茂县断裂由早期的逆冲性质,至白垩纪晚期逐渐转化为自南东向北西方向滑覆,这一运动学特征一直延续至今,因此汶川-茂县断裂在白垩纪以来整体上具有拆离性质,可谓青藏高原东缘韧性拆离断裂(崔军文等,2005;许志琴等,2007)。平衡剖面计算的龙门山逆冲断裂带的横向缩短率达57.2%(许志琴等,1992)。

3 汶川地震断裂带的同震破裂和 WFSD-1 的构造-岩石特征

“5.12”汶川特大地震形成的同震地表破裂带主要为映秀-北川断裂和灌县-安县断裂,前者是发震的主断裂,走向 $N40^{\circ}\sim 70^{\circ}E$,倾向NW,倾角 $70^{\circ}\sim 80^{\circ}$ (图1c),破裂面上发育同期的逆冲擦痕线理和近于水平的右行走滑型擦痕线理,并频见后者切割前者的同震破裂现象(李海兵等,2008;许志琴等,2008),破裂带长300km,最大垂直位移11m,水平位移达12m。灌县-安县断裂总体走向 $N30^{\circ}\sim 70^{\circ}E$,倾向NW,倾角 $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$,破裂带长80km(李海兵等,2008;李勇等,2008)。

汶川地震破裂带同震垂直位移的极大值出现在南段的虹口乡八角庙和北段的北川县城东侧,分别为5~6m和6~11m。最大右行位移出现在北川县城,实测的水平位移量约9m,推测的最大水平位移量达14~18m(李海兵等,2008)。WFSD-1即位于虹口乡八角庙,距“5.12”地震震中水平距离约90km,平面上与东侧主断裂的水平距离约400m(图3)。WFSD-1孔深1201m,按平均井斜 11° 计算的钻孔垂

直深度为1179m。钻孔中出现的地层和主要岩石类型,地表至孔深176m为震旦系下统的变英安岩,176~589.2m为年龄7~8亿年的新元古代彭灌杂岩,主要由二长花岗岩、花岗闪长岩等花岗质杂岩和变火山岩组成,589.2m以下至终孔(1201m)为三叠系上统须家河组,主要为由砂岩、砾岩、泥岩、页岩等组成的煤系地层(图4a)。地表断裂产状为走向 60° ,倾向NW,倾角 86° (李勇等,2008),震旦系下统变质火山岩向SE方向逆冲在三叠系上统须家河组煤系上,断裂下盘上三叠统上叠有由泥盆-石炭系组成的飞来峰(图3b),表明在虹口段映秀-北川断裂有相对较大的SE向逆冲推覆量。

WFSD-1岩芯的微构造现象极其发育,常见的有构造角砾岩、碎裂岩、断层泥和微断层等,大约在孔深590m变质火山岩和煤系的接触过渡带,发育一组和地表主断层产状十分接近的微断层系(图4a),并出现厚达70cm的断层泥(李海兵等,2008),它应代表YBF在WFSD-1孔内的延伸和深部断裂带的构造岩石组合。断裂带构造岩具有明显的构造分带现象:断裂带的中心部位为断层泥带,向两侧逐渐过渡为碎裂岩带和角砾岩带(图4b,c),地表YBF的碎裂岩带宽度愈10m。

4 从 ASR 地应力测试数据看区域构造应力场特征

WFSD-1是“汶川地震断裂带科学钻探”项目计划实施的4孔科学钻井中的第一口(许志琴等,2008),其目的之一就是尽快了解汶川地震震的构造应力场条件,为汶川地震形成机制的研究提供实测的地应力数据。

ASR法的测试是非弹性应变测试,通过对不同深度的每一定向岩芯,在6个不同方向,进行1~2周连续应变测试,以获取一个完整的三维应变张量,进行主应力方向和大小的计算,获取钻孔深部的地应力场(林为人,2008;王连捷等,2012)。在WFSD-1共获取7件有效的测试样品,其结果较好地反映了WFSD-1的原地应力状况。样品的钻孔深度、岩性和主要物性参数见文献(Cui *et al.*,2013)。

通过ASR测试,可以看出孔区的构造应力场具有下列几个重要特征。

4.1 以NW向近于水平挤压为主导,兼有右行走滑的构造应力场

在WFSD-1孔深585.5m出现的新元古代彭灌杂岩和上三叠统须家河组的分界断裂,倾向NW,倾角 57° (图4a),测井资料显示该深度以下2m范围内存在有由多条向北西方向陡倾微断层构成的断裂破碎带,据对585.4~594m井段提取的29条微断层的分析,得出其中产状相近的19条微断层的平均走向为 $N55^{\circ}E$,向NW倾斜,倾角为 71° ,与上述分界断裂(图4a)及映秀-汶川断裂地表产状(走向 60° ,向NW倾斜,倾角 86°)(李勇等,2008)接近,但略大于通过震源机制

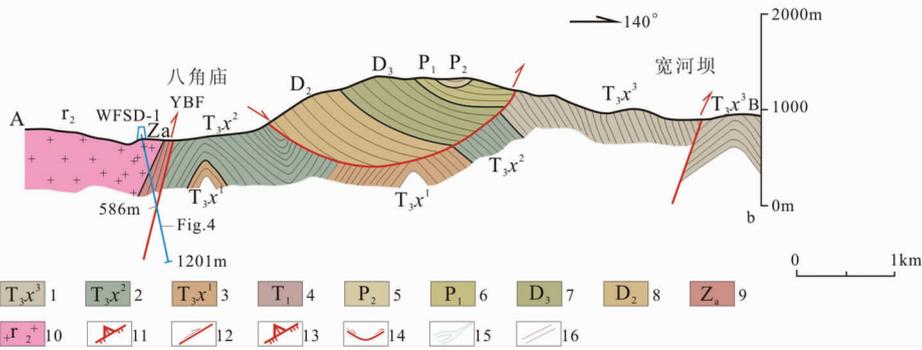
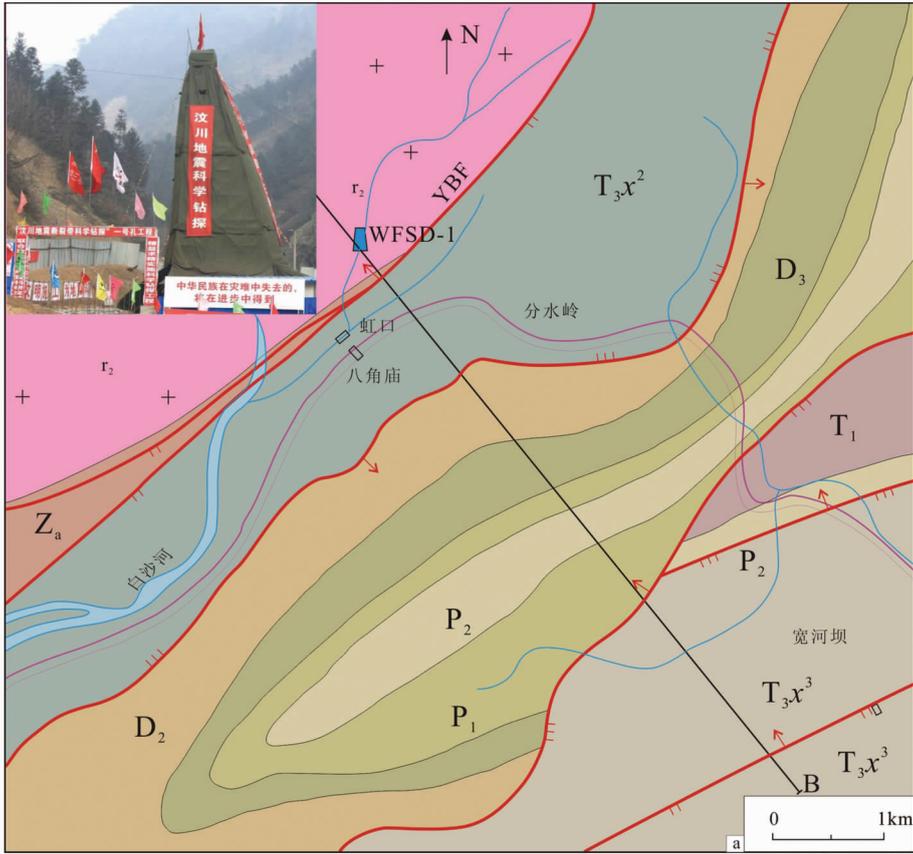


图3 WFS D-1 孔区地质简图(a, 据四川省地质矿产局, 1974^①编制)和垂直 YBF 的构造剖面图(b)

1-三叠系上统须家河组上段(T_3x^3); 2-三叠系上统须家河组中段(T_3x^2); 3-三叠系上统须家河组下段(T_3x^1); 4-三叠系下统; 5-二叠系上统(P_2); 6-二叠系下统(P_1); 7-泥盆系上统(D_3); 8-泥盆系中统(D_2); 9-震旦系下统变质火山岩组(Z_a); 10-元古代花岗岩(r_2); 11-冲断裂(a); 12-冲断裂(b); 13-逆冲推覆体(a); 14-飞来峰(b); 15-河流; 16-道路

Fig. 3 Geological sketch map of the WFS D-1 well site (a) and tectonic profile perpendicular to the YBF (b)

1-upper member of Upper Triassic Xujiahe Formation (T_3x^3); 2-middle member of Upper Triassic Xujiahe Formation (T_3x^2); 3-lower member of Upper Triassic Xujiahe Formation (T_3x^1); 4-Lower Triassic (T_1); 5-Upper Permian (P_2); 6-Lower Permian (P_1); 7-Upper Devonian (D_3); 8-Middle Devonian (D_2); 9-Lower Sinian metavolcanite formation (Z_a); 10-Proterozoic granite (r_2); 11- thrust fault (a); 12-thrust fault (b); 13-thrust-nappe (a); 14-klippe (b); 15-river; 16-road

① 四川省地质矿产局. 1974. 四川省 1:20 万彭灌幅地质图

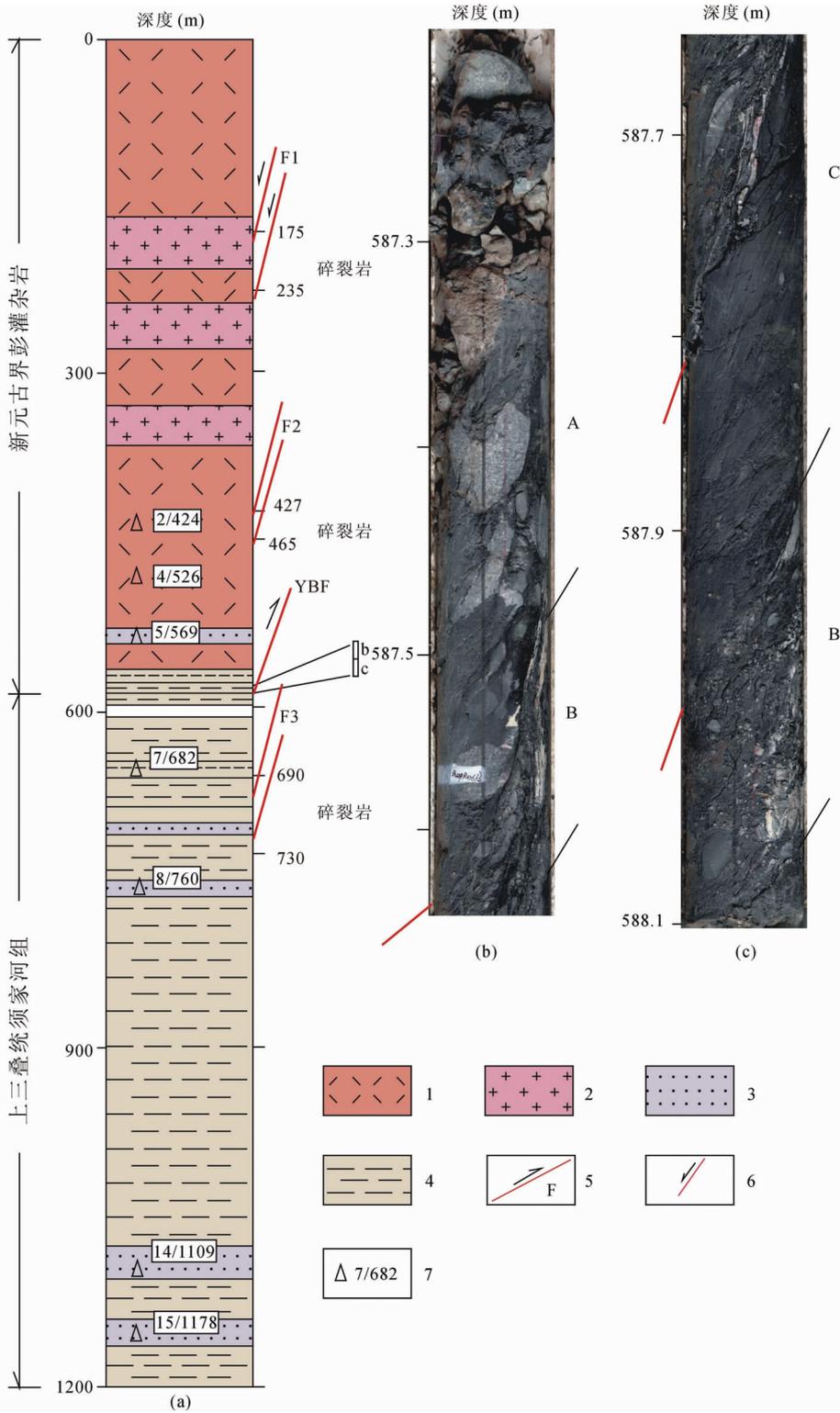


图4 WFSD-1 钻孔的岩性剖面
 (a) 钻孔地层和岩性,新元古界彭灌杂岩:1-震旦系变质火山岩;2-新元古代花岗岩;上三叠统:3-砂岩;4-粉砂岩;5-冲断裂;6-正断裂;7-试样点位置和样品编号;F-断层;YBF-映秀-北川断层。(b, c) 孔深 587.3 ~ 588.1m 岩芯:A-角砾岩;B-碎裂岩;C-断层泥

Fig.4 Lithologic section of WFSD-1
 (a) strata and lithology of the well, Neoproterozoic Pengguan complex; 1-Sinian metavolcanite; 2-Neoproterozoic granite. Upper Triassic: 3-sandstone; 4-siltstone; 5-thrust fault; 6-normal fault; 7-sampling location and sample number; F-fault; YBF-Yingxiu-Beichuan fault. (b, c) core at 587.6 ~ 588.1m well depth: A-breccia; B-cataclasite; C-fault gouge

表1 WFS-1 试样的应力方向和大小

Table 1 Orientations and magnitudes of the in-situ stresses in samples from WFS-1

样品号	主应力						铅直应力大小 (MPa)	最大水平应力		
	方向(倾伏方向,倾伏角)(°)			大小(MPa)				方向(°)	大小(MPa)	
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_1	σ_2	σ_3			σ_H	σ_h
No. 2	141,57	316,33	48,2	10.8	10.4	6.0	10.7	316	10.5	6.0
No. 4	316,4	46,7	191,83	16.7	13.8	13.2	13.2	315	16.7	13.8
No. 5	325,7	60,34	224,55	21.5	17.2	12.8	14.3	323	21.4	15.8
No. 7	291,50	136,37	36,13	23.7	18.6	14.9	17.1	303	21.6	18.5
No. 8	311, -11	37,19	249,68	25.2	21.5	18.5	19.1	328	25.0	21.1
No. 14	298,38	132,51	34,7	35.0	23.5	21.1	27.9	299	30.6	21.2
No. 15	296,26	188,33	56,46	35.3	29.0	27.7	29.5	301	34.0	28.5

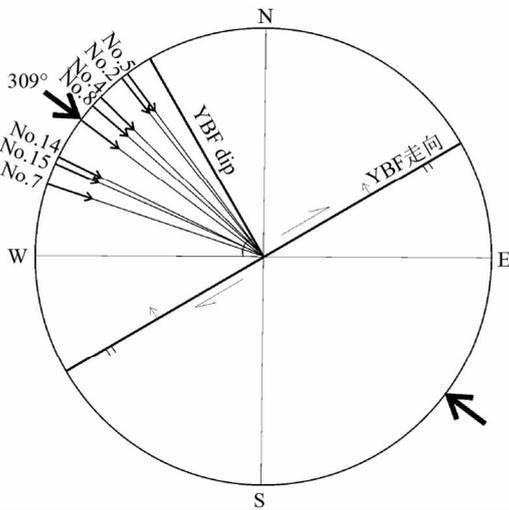


图5 最大主应力方位与孔区映秀-北川断裂(YBF)地表断裂走向关系

孔区 YBF 的地表产状为:走向 60° , 向 NW 倾斜, 倾角 86° , No. 2-No. 15 为 WFS-1 测试样品号, 细箭头示相应试样的最大主应力方位, 粗箭头示 7 件试样的最大主应力平均方位

Fig. 5 Relationship of the maximum principal stress orientations with the surface strike of the Yingxiu-Beichuan fault in the well site

Surface attitude of the fault: strike 60° , dipping NW, dip angle 86° . No. 2 to No. 15 are the sample numbers of WFS-1, the fine arrow indicates the orientation of maximum principal stress corresponding specimens, and the bold arrow showing the average orientation of maximum principal stress for the 7 samples

解得出的震源点上断层的产状(倾向 328° , 倾角 59°) (嵇少丞等, 2008)。因此将映秀-北川断裂的优势产状确定为: 走向 $N55^\circ \sim 60^\circ E$, 向 NW 倾斜, 倾角 $59^\circ \sim 86^\circ$ 用于区域构造应力场的分析较为合理。我们获取的 7 件试样中 6 件的 σ_1 倾伏方向为 $291^\circ \sim 325^\circ$, 1 件的 σ_1 倾伏方向为 141° , 倾伏角多数小于 50° , 以 $4^\circ \sim 38^\circ$ 居多(表 1、图 5), 和震源机制得出的主应力方向(倾伏方向 302° , 倾伏角 06°) (嵇少丞等, 2008) 十分接近, σ_1 方位和映秀-北川断裂的走向接近垂直或高角

度相交, 显示发震断裂以近于垂直断裂走向的逆冲作用为主, 并伴有右行走滑性质, 即 YBF 的北西盘相对南东盘自南西北东方向斜冲(图 5)。ASR 原地应力测试结果与“5.12”地震中广泛出现的以逆冲为主, 兼有右行走滑性质的同震破裂现象及汶川地震的逆冲-右行走滑型震源机制的结论(付小方等, 2008; 李海兵等, 2008; 李勇等, 2008; 许志琴等, 2008; 滕吉文等, 2009; 王连捷等, 2009) 相吻合。

4.2 构造应力场的垂向不均一性

WFS-1 的原地应力测试数据表明, 尽管主应力值和水平应力值与深度成正相关关系, 即应力值的大小随地壳深度增加而加大(图 6a), 但不同应力值的增加幅度并不一致。根据地应力随深度增加的回归曲线(王连捷等, 2012), 应力值随深度的增加, 以 σ_v 的递增率最大 ($R^2 = 1$), 由 $\sigma_1 \rightarrow \sigma_H \rightarrow \sigma_3 \rightarrow \sigma_2$, 递增率逐渐递减 (R^2 依次为 0.97、0.95、0.91、0.88), 递增率最小的为 σ_h ($R^2 = 0.86$) (王连捷等, 2012; Cui *et al.*, 2013), 即随着深度增加, 差异应力值 ($\sigma_1 - \sigma_3$, $\sigma_H - \sigma_h$) 将不断增大。差异应力值 ($\sigma_1 - \sigma_3$ 和 $\sigma_H - \sigma_h$) 是决定构造变形强度的主要因素之一, 可见, 在同一构造条件下, 构造变形强度将随着深度的增加而不断加大。

4.3 WFS-1 垂向构造状态和变形机制的差异

映秀-北川断裂是由一系列次级断裂(或断裂破碎带)和构造岩片组成的巨型断裂带, WFS-1 揭示的断裂带总厚度约 300m ($427 \sim 730$ m), 除孔深 589.6m 映秀-北川断裂主断面通过部位形成厚度近 50m ($583 \sim 625$ m) 的断裂破碎带(YBF)外, 至少在 $175 \sim 235$ m (F_1)、 $427 \sim 465$ m (F_2) 和 $690 \sim 730$ m (F_3) 深度还存在 3 条具有一定规模的次级断裂破碎带, 我们采集的 7 个样品, 样品 No. 2 位于 F_1 与 F_2 间, 样品 No. 4、No. 5、No. 7 和 No. 8、No. 14、No. 15 则分别位于 F_2 与 F_3 间和 F_3 的下盘(图 4a)。最大水平应力、最小水平应力和铅直应力三者关系是判断岩石构造状态的重要依据之一 (Amadei and Stephanson, 1992), 7 个样品的应力值反映 WFS-1 不同断片的构造状态存在有重大差异: 样品 No. 2, 三者间的关系为 $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ (图 6b), 基本上反映了钻孔最

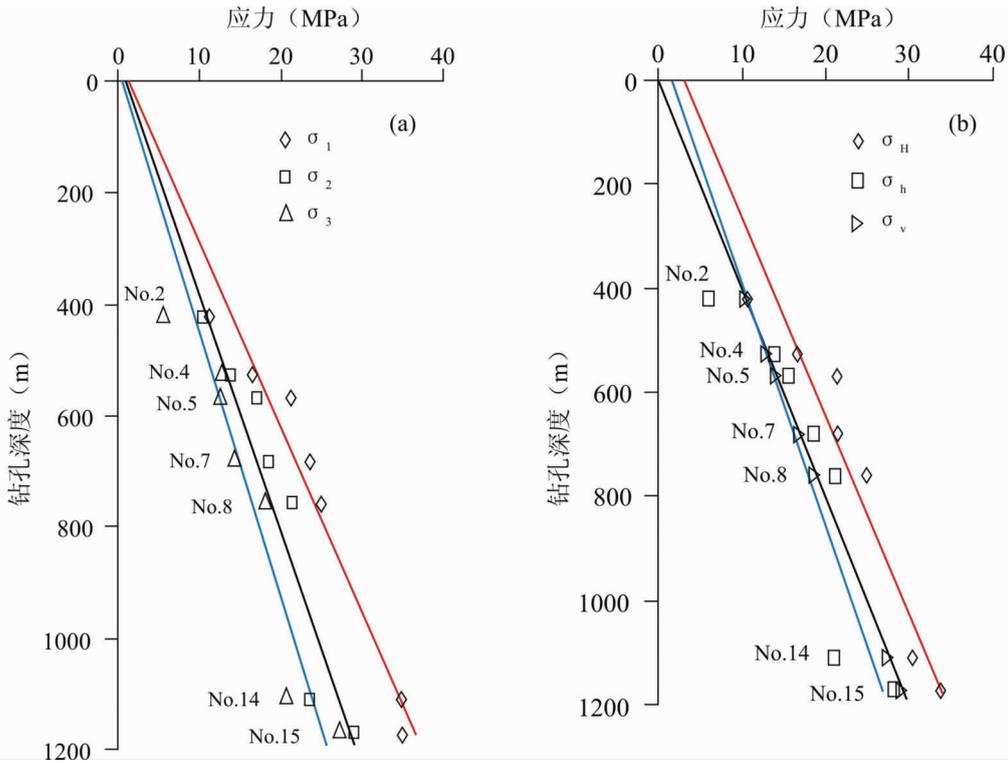


图6 WFSD-1 应力大小与深度相关图

(a)-主应力大小与深度相关图;(b)-水平应力大小与深度相关图. No. 2-No. 15 为试样编号; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$ 依次为最大主应力、中间主应力、最小主应力和最大水平应力、最小水平应力和铅直应力

Fig.6 Depth profile of the magnitudes of stresses in WFSD-1

(a)-depth profile of the magnitudes of principal stresses; (b)-depth profile of the magnitudes of horizontal stresses. No. 2 to No. 15 are the sample numbers; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$ are the maximum, intermediate, minimum principal stresses and the maximum, minimum horizontal stresses and the vertical stress respectively

上部的断片(地表至 F_2 断裂)以拉张为主的构造状态,样品 No. 4、No. 5 采于映秀-北川断裂带,其 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$ 的应力关系,反映了 YBF 以逆冲为主的构造变形特征。而样品 No. 7、No. 8、No. 14 和 No. 15 尽管都采自三叠系上统的须家河组煤系,但反映的构造状态明显不一,位于断裂带下盘的 No. 7、No. 8, σ_H 、 σ_h 和 σ_v 的关系为 $\sigma_H > \sigma_h > \sigma_v$, 远离断裂带的 No. 14 和 No. 15,三者关系为 $\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ (图 6b),说明接近 YBF 的上三叠统卷入了主断裂的逆冲作用,而远离断裂带的上三叠统则处于走滑构造状态,后者或许代表了龙门山前陆盆地右行走滑或旋转的主体运动学特征。可见映秀-北川断裂与其上的松潘-甘孜地块和其下的龙门山前陆盆地的构造状态和变形机制有重大差异。

5 “5.12”汶川地震的成因机制

龙门山前陆逆冲带处于松潘-甘孜地块的前缘,晚白垩世以来印度板块和欧亚板块碰撞及陆内俯冲作用导致松潘-甘孜地块的 E 向扩展,由于受刚性扬子板块的阻挡,在龙门山地区造成强烈的横向缩短和挤压(许志琴等,1992,

2006)。汶川地震的同震位移场(国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组,2008)反映,映秀-北川断裂西侧的龙门山构造带和东侧的四川盆地在地震过程中分别具有向 E、向 N(向 NE 方向)和向 W、向 S(向 SW 方向)的水平位移,而且 E 向和 N 向的位移幅度要大于 W 向和 S 向的位移幅度,即龙门山前陆逆冲带的 NE 向运动速度要大于四川盆地的 SW 向运动速度。地质演化历史和汶川地震的同震位移场资料都表明,龙门山前陆逆冲断裂带的主干断裂映秀-北川断裂应是青藏高原东缘位移动场和变形场的重要分界(图 2)。晚白垩世以来青藏高原腹地的 E 向扩展和对龙门山前陆逆冲带的持续挤压,是导致龙门山地区强烈逆冲作用、地壳增厚和急剧抬升的主因(崔军文等,1999, 2006; Tapponnier *et al.*, 2001; 许志琴等,2006, 2007),这是汶川地震发生的大区域构造背景。

大地电磁和反射地震资料显示松潘-甘孜地块在深度 15 ~ 20km 和 30km 存在有上、下 2 个近于水平的拆离层(楼海等,2008; 朱迎堂等,2008),它们往东延伸,逐渐抬升,并与龙门山前陆逆冲带相连,可见,龙门山前陆逆冲带是一地表陡倾,往深部延伸逐渐变缓的铲形逆冲断裂系(图 7),拆离层

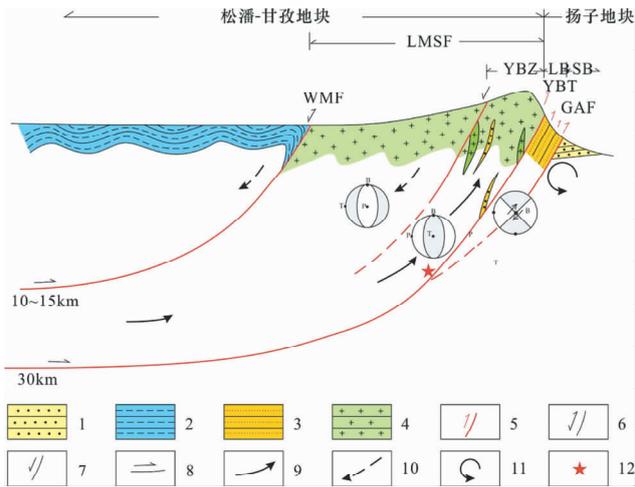


图7 汶川地震形成机制解释图

1-中生-新生界;2-三叠系复理石;3-上古生-中生界;4-彭灌杂岩;
5-冲断裂;6-后期转化为正断裂的冲断裂;7-正断裂;8-拆离方向;
9-逆冲型剪切运动方向或垂向挤出方向;10-正滑型剪切运动方向
或整体滑落方向;11-地块旋转方向或右行剪切运动方向;
12-“5.12”地震震中位置. 松潘-甘孜地块(SG):LMSF-龙门山前陆
逆冲带;WMF-汶川-茂县断裂;YBF-映秀-北川断裂;YBZ-映秀-北
川垂向挤出构造带或逆冲叠覆带;扬子地块(YZ);LB-龙门山前陆
盆地;SB-四川盆地. P-压应力轴;B-中间应力轴;T-张应力轴

Fig.7 Simplified diagram showing the formation mechanism
for the Wenchuan earthquake

1-Mesozoic-Cenozoic; 2-Triassic flysch; 3-Upper Paleozoic- Mesozoic;
4-Pengguan complex; 5-thrust fault; 6-thrust late into normal fault;
7-normal fault; 8-detachment direction; 9-thrust shear direction and
vertical extrusion direction; 10-positive slip shear direction or direction
of the overall slipping; 11-block rotational direction or dextral shear
direction; 12-epicenter location of “the May 12” earthquake. Songpan-
Garzê block (SG); LMSF-Longmenshan foreland obduction zone; WMF-
Wenchuan-Maoxian fault; YBF-Yingxiu-Beichuan fault; YBZ-Yingxiu-
Beichuan verticale extrusion structural zone or obduction overlap zone;
Yangtze block (YZ); LB-Longmenshan foreland basin; SB-Sichuan
basin. P-compressive stress axis; B-intermediate stress axis; T-tensile
stress axis

是制约龙门山构造带逆冲作用和山体抬升及松潘-甘孜地块
向东扩展的主要构造界面。汶川地震的震中深度为 18.8km
(吴建平, 2009), 余震深度以 5~25km 居多(丁志峰和李
丽, 2011), 说明汶川地震及其余震的发生与深部的拆离-逆
冲作用密切相关, 拆离层应视为龙门山前陆逆冲带深部的强
活动构造层和应变层, 它是遍及青藏高原的壳内拆离层(崔
军文等, 1999)的东延, 松潘-甘孜地块上、下两个拆离层的存
在表明龙门山地区深部具多重拆离特征。通过 ASR 测试所
获得的原地应力场的最大主应力(σ_1)平均方位为 309° , 侧
伏角为 $3^\circ \sim 31^\circ$, 与 GPS 测量所获得的区域位移场(Chen
et al., 2000; 张培震等, 2002)和同震位移场的运动方向(国家
重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组, 2008)基本

一致(图 2c), 表明导致 YBF 的强烈逆冲-右行走滑(斜冲)作
用及汶川地震形成的主压应力来自松潘-甘孜地块的向东南
方向的、近于水平的挤压(崔军文等, 1999)。

地震的震级决定于地震能量的积聚, 而地震能量的积聚
和释放, 又与构造岩石的力学性质息息相关, 抗张强度大的
岩石不易破裂, 而利于应力和能量的长期积聚, 导致强震的
发生。龙门山前陆逆冲带的主体是以花岗岩质岩石为主的新
元古界-震旦系龙门山杂岩, 岩石的抗张强度远远大于普通
沉积岩和浅变质类岩石的抗张强度, 说明龙门山深部要达到
足够的应力集中和能量积聚后, 岩石才能破裂, 并诱发地震,
但一旦发生地震, 其能量和地震强度要远远大于抗张强度小
的震区的地震强度。所以尽管龙门山地区少地震, 但偶然的
强震仍有发生, 如龙门山前陆逆冲带中段, 1937 年发生了震
惊中外的、震级达 7.9 级的叠溪地震(洪时中和徐吉言,
2009)。地震能量通过映秀-北川断裂和灌县-安县断裂的强
烈逆冲作用, 得到快速释放, 地震作用后期沿映秀-北川断
裂带的大量正断层和构造滑覆作用使地震能量得到最终释
放, 并诱导了大量次生地质灾害。

汶川地震的同震破裂带, 在时空上具有明显的不均一
性: 沿断裂倾向, 映秀-北川断裂表现为逆冲和右行走滑, 而
灌县-安县断裂, 仅具逆冲性质; 沿走向, 以绵竹县青平乡
为界(图 2a), 南段(映秀-清平段)发育两期破裂, 而青平乡
以北的北段仅出现右行走滑破裂, 北东段的走滑分量要大于
南西段的走滑分量; 时间上, 初期破裂以逆冲为主, 后期破
裂以右行走滑为主(许志琴等, 2008; Xu *et al.*, 2008; 李勇
等, 2008)。汶川地震的余震以同震破裂带具逆冲性质的彭
灌杂岩段, 余震强度大, 分布范围广, 随着同震破裂带逐
渐由逆冲性质转化为右行走滑性质, 余震分布范围和强度都
逐渐递减(付小方, 2008; 嵇少丞等, 2008; 李海兵等, 2008;
刘静等, 2008; 张岳桥等, 2008)。可见汶川地震的能量是
以震源区为中心, 逐渐向外(E)和向 NE 方向转播的。

可以设想当相对柔性的松潘-甘孜地块由于青藏高原的
E 向扩展而导致向 E 挤压时, 受到相对刚性的扬子地块的
阻挡, 在龙门山前陆逆冲带造成强烈的构造挤压, 断裂带上
盘的 E 向水平推挤力将逐渐减小, 水平挤压作用逐渐转化
为向上的推挤作用, 导致龙门山山体的抬升及山体载荷的
不断增大。构造应力场制约了位移场, 当龙门山前陆逆冲
带深部的向东水平推挤作用转化为垂直向上的挤出作用时,
在能量得不到完全释放的条件下, 水平位移最小, 而向上
的推挤力和垂向位移最大, 即龙门山具有最大的隆升速率
和最小的东向水平移动速率, 在地质历史时期两者互呈消
长关系。白垩纪以来, 龙门山前陆盆地晚新生代-始新世
的残余沉积厚度达 3400m, 发育多套磨拉石沉积(许志琴
等, 2006), 而晚始新世以来的沉积厚度仅 450 余米, 尽
管发育多套磨拉石沉积和角度不整合(李勇等, 2006),
但表明龙门山的抬升幅度及其与四川盆地间的差异性升
降作用已明显减小。10Ma 以来, 龙门山前陆逆冲带的隆
升速率仅为 0.5~0.6mm/a, 四川盆地

为0.028~0.05mm/a(刘树根等,1995),但GPS资料显示川西地块和四川盆地间有4~8mm/a的缩短作用(张培震等,2002),可见由挤压、缩短导致的深部能量积聚不可能通过龙门山体的抬升得到完全释放,因此,尽管龙门山地区水平位移速率很小,但深部一直处于强烈挤压和应力、能量的不断积累和汇聚之中。因此应将水平位移和垂直位移相结合作为判断深部应力和能量积聚及地震发生的重要标志,而不是仅以水平位移作为预测地震能否发生的唯一标志,在水平位移大而垂直位移小的地区更应警惕其深部能量积聚导致强震发生的可能。10Ma以来,YBF西侧的隆升速率是东侧的隆升速率的40倍(刘树根等,1995),足以表明龙门山前陆逆冲带相对四川盆地深部蕴藏的巨大地震能量,这在地震预报和重大工程建设中永远值得我们高度警惕。

当地震能量以震中区为中心向外传播时,由于龙门山断裂带南西是以抗张强度大的宝兴杂岩和康定杂岩为主体,加之康定-孔玉一带出现的向N和NW方向的构造运动或推挤(许志琴等,1992)(图2a),它阻挡了地震能量向SW方向的扩展或传播,而迫使其主要沿YBF断裂带向NE和向E方向传递,这是汶川地震的同震破裂带为单极扩张型破裂的主因。在地震能量传播过程中,水平的推挤力将分解为平行断裂倾向和走向的水平分力,两者分别导致断裂的逆冲型位移(S_1)和右行走滑位移(S_2),随着地震能量逐渐远离震源区, S_1 将不断递减, S_2 逐渐递增,最终将由震源区的最大逆冲型位移(S_1)和最小右行走滑位移($S_2 \approx 0$)完全过渡为仅有右行走滑位移(S_2),而无逆冲型位移($S_1 \approx 0$),即完全由震源区的逆冲作用转化为远离震源区的单一右行走滑作用。青平乡以北仅出现右行走滑型同震破裂而无逆冲型同震破裂(付小方等,2008),表明在该处逆冲型位移(S_1)和逆冲作用得到了完全释放,青平乡地区是地震能量释放的重要转折部位。

龙门山前陆逆冲带以具多岩片叠覆、并经历强烈韧性逆冲型剪切作用为特征,龙门山前陆逆冲带的位移场在汶川地震中发生了急剧的变化,不仅地质历史时期龙门山断裂两侧的同向水平位移速度增大,而且断裂两侧发生强烈的差异性升降:YBF断裂上盘急剧抬升,断裂西侧的松潘-甘孜地块和东侧的龙门山前陆盆地则快速下沉(国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组,2008),表明地震过程中,龙门山前陆逆冲带的主导动力仍来自西侧的松潘-甘孜地块,而且在前陆带发生强烈水平挤压和缩短作用的同时,沿YBF断裂的主断裂带发生急剧的垂向挤出。

龙门山前陆逆冲带的强烈挤压和水平缩短及龙门山体的快速抬升,时间上可能始于汶川-茂县断裂由逆冲断裂转化为正断裂和龙门山前陆盆地强烈活动的白垩纪时期(刘树根等,1995;许志琴等,2006)。但汶川地震的发生,则是龙门山前陆逆冲带的深部应力积聚达到花岗质岩石(彭灌杂岩)的抗张强度,构造状态发生重大转折,即由水平挤压快速转化为垂直向上的挤出作用的结果,在时间上,推测发生在龙门山快速隆升的中上新世(10Ma)以后。

当龙门山前陆逆冲带沿YBF快速向上挤出时,其下伏的龙门山前陆盆地则主体呈现以近于水平的右行旋转或右行走滑作用为特征(图7),相对龙门山前陆逆冲带作自NE往SW方向的斜插,而上覆的松潘-甘孜地块则呈现由前期的自NW往SE方向的强烈逆冲,叠覆转化为自SE往NW方向的重力滑覆,因此从整体上看,在汶川地震中,龙门山前陆逆冲带表现为在强烈的区域性挤压背景下,深部物质沿壳内拆离层自SW向NE方向的“层状”物质流动,在地壳上部转化为沿YBF的快速垂向挤出,而其两侧的松潘-甘孜地块和龙门山前陆盆地则相对下滑或沉降,地震能量在地震过程中得到快速衰减。松潘-甘孜地块的壳内拆离层在深部以高温、低粘度为特征,在地壳浅部分别以汶川-茂县断裂(图1e)和映秀-北川断裂为其上、下边界,前者经历了中低温,局部高温韧性滑覆剪切作用(许志琴等,2006)。地应力测试结果更进一步揭示了挤出作用的西界已由早期的汶川-茂县断裂向东扩展到映秀-北川断裂带和龙门山杂岩体的构造边界,沿映秀-北川断裂带的主断裂转化为垂向挤出或逆冲叠覆(映秀-北川垂向挤出构造带或逆冲叠覆带)(图7)。可见,龙门山前陆逆冲带深部高温低粘度物质的快速、垂向向上流动和挤出,直接导致了“5.12”汶川地震的发生。

6 讨论和结论

通过对WFSD-1的ASR地应力测试,结合区域地质,特别是区域构造和地球物理资料的综合分析,可以得出下列几点初步结论。

6.1 以NW-SE向近于水平挤压为主导的区域构造应力场

孔区的最大主应力方向为 $274^\circ \sim 315^\circ$,7个测点的 σ_1 平均方位为 309° ,与前人用多种地应力测试方法获得的最大主应力方向(许忠淮,2001;安其美等,2004;国家地震专家委员会,2008;杜义等,2009;Wu *et al.*, 2009;彭华等,2009;Huang *et al.*, 2009)基本一致, σ_1 的侧伏角绝大部分小于 40° (表1),显示“5.12”汶川特大地震发生的主要机制与NW-SE向近于水平挤压而导致的龙门山前陆逆冲带向SE方向的逆冲扩展和同时兼有的右行走滑作用相关,这与汶川地震作用过程中出现的大量逆冲-右行走滑型同震破裂现象(付小方等,2008;李海兵等,2008;Xu *et al.*, 2008)和汶川地震的逆冲-右行走滑型震源机制解(滕吉文等,2009;王连捷等,2009)的结论吻合,可见WFSD-1的ASR测试获得的原地应力状态在龙门山地区是有代表性的。因此从宏观上看,ASR方法完全可用于地震断裂带深部岩芯的地应力测量,作为其它地表地应力测量方法的重要补充。较其它方法(王连捷等,1993;彭华等,2009;Cui *et al.*, 2009)而言,ASR法的测试所获得的原地应力场,内容更丰富。因此,ASR法被认为是大地震后快速钻探中获取深达数千米地震断裂带岩石块体应力状态的比较简便和廉价的方法。

6.2 主压应力方向与 GPS 速度场和同震位移场的一致性

ASR 地应力测试得出的主压应力方向和 GPS 速度场(张培震等,2002)的位移方向在宏观上的一致性(图 1b),表明在龙门山构造带确实存在有自 NW 向 SE 方向的运动,即松潘-甘孜地块向扬子地块的逆冲扩展。主压应力方向完全平行于 GPS 同震速度场的位移方向(图 1c),这一事实似乎表明 ASR 测试得到的原地应力场或许真实地反映了或最接近于地震过程中的构造应力场,主压应力方向反映了深部的物质运动方向,因此,完全可通过钻孔 ASR 地应力测试获取现今的构造应力场和位移场,服务于当代的工程建设。

6.3 晚新生代以来龙门山前陆盆地的动力学特征

WFSD-1 地应力测试获得的 σ_H 、 σ_h 、 σ_v 三者关系显示龙门山前陆逆冲带与其下伏的龙门山前陆盆地的构造和地应力状态存在有重大差异,龙门山前陆逆冲带表现为自 NW 向 SE 的强烈逆冲-右行走滑(斜向逆冲)作用,而下伏的龙门山前陆盆地则表现为右行旋转。说明扬子地块相对于青藏高原东缘的龙门山造山带并无明显的或大尺度的陆内俯冲作用发生,这点可从龙门山前陆盆地的沉积建造和深部地球物理资料得到进一步佐证。

龙门山前陆盆地的沉降始于晚三叠世,晚三叠-晚白垩世时期,前陆盆地的沉降和龙门山的抬升基本呈正相关关系,但晚白垩世以来,龙门山山体的抬升速率要远远大于前陆盆地的沉降速率,10Ma 以来,YBF 两侧隆升速率的差异几乎达 40 倍(刘树根等,1995,2003)。所以尽管晚新生代前陆盆地发育有典型的磨拉石建造,但沉积厚度仅 450m,而且盆地中主要发育一系列轴向 NEE 的斜列式隆起、拗陷和同向正断裂,其形态特征(李勇等,2006)及盆地沉积中心自 NE 向 SW 的迁移(许志琴等,1992)显示晚新生代以来,前陆盆地以自 NE 往 SW 推挤,即右行旋转为主的动力学特征。始新世-渐新世是前陆盆地沉降-隆起的重要转折期(刘树根等,1995)。龙门山地区的速度结构表明,尽管扬子地块中下地壳-上地幔的高速体向西延伸至松潘-甘孜地块(吴建平,2009),但在盆地结合部位并无明显的错断。可见,龙门山前陆盆地相对松潘-甘孜地块在晚新生代以来并无大尺度的陆内俯冲作用,龙门山前陆盆地整体上相对龙门山前陆逆冲带作右行旋转,这与前陆盆地中新世代以来的变形构造特征(李勇等,2006)和上三叠统须家河煤系处于右行走滑作用的构造应力状态(图 7)是完全吻合的。因此,ASR 的地应力测试结果对龙门山前陆盆地形成机制和动力学过程的探讨及解释提供了一种新的思路。

6.4 关于“5.12”汶川地震的形成机制

有关汶川地震的形成机制,目前流行的两种最重要的观点是:(1)地壳挤压增厚说,认为汶川地震的形成与青藏高原

东向扩展导致的龙门山地区强烈挤压、缩短与地壳垂向增厚作用相关;(2)垂向挤出说,汶川地震是龙门山深部低粘度物质的向外挤出作用的结果(Royden *et al.*, 1997;许志琴等,2006, 2008; Burchfiel, 2008; Hubbard and Shaw, 2009)。同震位移场资料表明汶川地震发生时龙门山前陆逆冲带的位移场发生了急剧的变化,在垂直断裂带的水平挤压作用增强的同时,沿 YBF 断裂带发生了快速抬升,而其两侧的松潘-甘孜地块和龙门山前陆盆地的则快速下沉。地表位移场的变化是深部积聚的地震能量和位移场发生重大转折的反映,垂向位移速度和差异性升降速度的急剧增大,只有在位移场或构造应力场发生突变的条件下,即深部的高温、低粘度物质在 σ_1 近于水平转化为 σ_1 近于直立的构造状态下,水平推挤作用迅速转化为垂向挤出作用,并作“层状”或“片状”流动时才有可能。地震能量沿 YBF 走向的传播和扩展,并导致沿断裂走向自南西往北东方向逆冲型位移分量(S_1)的递减和水平右行走滑分量(S_2)的递增,也只有在地震能量沿近于直立的“层状”或“片状”构造的走向传播时才能实现。可见,龙门山前陆逆冲带深部高温低粘度物质垂直向上的、快速的流动和挤出,直接导致了“5.12”汶川地震的发生,而松潘-甘孜地块 E 向扩展导致龙门山前陆带的强烈挤压和陆壳增厚及深部应力和地震能量的积聚则是诱导深部位移场发生突变和物质快速垂向挤出的主因,后者是前者的必要条件,而非直接结果。

7 问题和讨论

应力是诱导岩石圈构造作用的最重要的驱动机制,地震的发生标志岩石圈应力状态的突变,它提供了探讨和追溯构造能量积聚、传播和释过程的重要信息。但是如何认识岩石圈的构造应力状态,特别是地震中释放的构造应力与震前、震后的构造应力的关系,至今并未找到完善的解决方法 and 研究途径。目前存在有多种地应力测试方法,本文取得的研究成果是基于 ASR 法及 WFSD-1 所获取的 7 个原地应力数据并结合地质资料的初步分析,难免使认识带有一定的局限性。ASR 地应力测试法,相对其它方法而言,其所获得的原地应力场或许真实地反映了或最接近于地震过程中的构造应力场,最大主应力方向基本能代表震前的压应力方向和深部的物质运动方向,因此,我们完全可通过钻孔 ASR 地应力测试获取现今的构造应力场和位移场。本文研究所获得的另一重要认识是龙门山构造带具有强烈差异性动力学特征,在垂向表现为主断裂(前陆逆冲带)强烈逆冲-叠覆、上盘相对下滑及下盘龙门山前盆地右行走滑。这些认识尽管基本吻合 WFSD-1 孔区的地质现象,但在龙门山地区是否具有普遍性,并得到地球物理和更多区域构造资料的支持,尚待更多地应力资料,特别是其余 3 孔地应力测试数据的支持。对汶川地震形成机制的分析,也需在今后研究中不断完善。地质资料是提高地应力数据分析和解释可信度的重要

依据和鉴别标准。用其它地应力测试法获得的地应力数据是否支持 ASR 法的测试结果,特别是得到区域构造和同震破裂现象的佐证,是 ASR 测试取得成功的关键。

致谢 研究工作中得到项目首席科学家许志琴院士、张伟总工程师、李海兵总地质师、牛一雄研究员和彭华研究员等的大力支持和帮助,文中多处应用了测井组和相关地球物理资料。在项目组织的历次工作会议和学术交流会,受益匪浅。ASR 的现场测试工作由黄尧工程师完成,文中插图由王晓娟完成,《汶川地震断裂带科学钻探》项目办公室和钻探组给 ASR 现场实验室的建立、测试和论文的完成等提供了许多有益的帮助和大力支持。在此特向以上单位和个人致以诚挚的谢意。

References

- Amadei B and Stephanson O. 1992. Rock Stress and Its Measurement. London: Chapman & Hall, 1 - 490
- An QM, Ding LF, Wang HZ and Zhao SG. 2004. Research of property and activity of Longmen Mountain fault zone. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 24 (2): 115 - 119 (in Chinese with English abstract)
- Barton CA, Zoback MD and Burns KL. 1988. In-situ stress orientation and magnitude at the fenton geothermal situ, New Mexico, determined from wellbore breakouts. *Geophysical Research Letters*, 15 (5): 467 - 470
- Brudy M, Zoback MD, Fuchs K, Rummel F and Baumgärtner J. 1997. Estimation of the complete stress tensor to 8km depth in the KTB scientific drill holes: Implications for crustal strength. *Journal of Geophysical Research*, 102 (B8): 18453 - 18475
- Burchfiel BC, Royden LH, van der Hilst RD, Hager BH, Chen Z, King RW, Li C, Lu J, Yao H and Kirby E. 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China. *GSA Today*, 18 (7), doi: 10.1130/GSATG18A.1
- Byrne T, Lin W, Tsutsumi A, Yamamoto Y, Lewis J, Kanagawa K, Kitamura K, Yamaguchi A and Kimura G. 2009. Anelastic strain recovery reveals extension across SW Japan subduction zone. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (23): L01305, doi: 10.1029/2009GL040749
- Chen JH, Liu QY, Li SC, Guo B, Li Y, Wang J and Qi SH. 2009. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake sequence. *Chinese Journal of Geophysics*, 52 (2): 390 - 397 (in Chinese with English abstract)
- Chen YT. 2008. On the magnitude and the fault length of the Great Wenchuan Earthquake. *Review Science and Technology*, 26 (10): 26 - 27 (in Chinese with English abstract)
- Chen YT, Xu LS, Zhang Y *et al.* 2008. Report of the great Wenchuan earthquake source of May 12, 2008. <http://www.csi.ac.cn/sichuan/chenyuntai.pdf> (in Chinese)
- Chen ZL, Burchfiel BC, Liu Y, King RW, Royden LH, Tang W, Wang E, Zhao J and Zhang X. 2000. Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B7): 16215 - 16227
- Cui JW, Tang ZM, Deng JF, Yue YJ, Meng LS and Yu QF. 1999. Altun Fault System. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 249 (in Chinese with English abstract)
- Cui JW, Zhang XW and Tang ZM. 2006. Tectonic divisions of the Qinghai-Tibet Plateau and structural characteristics of deformation on their boundaries. *Geology in China*, 33 (2): 256 - 267 (in Chinese with English abstract)
- Cui JW, Wang LJ, Li PW, Tang ZM and Sun DS. 2009. Wellbore breakouts of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) and determination of the present tectonic stress state. *Tectonophysics*, 475 (2): 220 - 225
- Cui JW, Lin WR, Wang LJ, Gao L, Huang Y, Wang W, Sun DS, Li ZF, Zhou JC, Qian HS, Peng H, Xia KM and Li K. 2013. Determination of three-dimensional in situ stresses from Anelastic Strain Recovery (ASR) of Wenchuan Earthquake Fault Scientific Drilling Project Hole-1 (WFSD-1). *Tectonophysics*, under review
- Du Y, Xie FR, Zhang XL and Jing ZJ. 2009. The mechanics of fault slip of M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. *China Journal of Geophysics*, 52 (2): 464 - 473 (in Chinese with English abstract)
- Fu XF, Hou LW, Li HB, Wang ZX and Zou FG. 2008. Coseismic deformation of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake and its relationship with geological hazards. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1733 - 1746 (in Chinese with English abstract)
- Hong SZ and Xu JT. 2009. History will remember them forever: Commemorating Seniors Who had Made the Contribution in Dixi Earthquake on August 25, 1933. *Recent Developments in World Seismology*, (2): 30 - 38 (in Chinese with English abstract)
- Huang RQ, Wang Z, Pei SP and Wang YS. 2009. Crustal ductile flow and its contribution to tectonic stress in Southwest China. *Tectonophysics*, 473 (3 - 4): 476 - 489
- Hubbard J and Shaw JH. 2009. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan ($M_s = 7.9$) earthquake. *Nature*, 458 (7235): 194 - 197
- Hung JH, Ma KF, Wang CY, Ito H, Lin WR and Yeh EC. 2009. Subsurface structure, physical properties, fault-zone characteristics and stress state in scientific drill holes of Taiwan Chelungpu Fault Drilling Project. *Tectonophysics*, 466 (3 - 4): 307 - 321
- Ji SC, Wang X, Sun SS, Xu ZQ and Li HB. 2008. Continental extrusion and seismicity in China. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1644 - 1667 (in Chinese with English abstract)
- Li HB, Fu XF, van der Woerd J, Si JL, Wang ZX, Hou LW, Qiu ZL, Wu FY, Xu ZQ and Tapponnier P. 2008. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1623 - 1643 (in Chinese with English abstract)
- Li SG. 1977. *On the Earthquake*. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 160 (in Chinese)
- Li Y, Zhou RJ, Densmore AL and Ellis MA. 2006. Geomorphic and sedimentary evidence for reversion of strike-slip direction in Longmenshan Fault Zone. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 26 (4): 26 - 34 (in Chinese with English abstract)
- Li Y, Zhou RJ, Alexander LD, Yan L, Nicholas R, Dong SL, Michael AE, Zhang Y, He YL, Chen H, Qiao BC and Ma BL. 2008. Surface rupture and deformation of the Yingxiu-Beichuan fault by the Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1688 - 1706 (in Chinese with English abstract)
- Lin W, Kwasniewski M, Imamura T and Matsuki K. 2006. Determination of three-dimensional in situ stresses from anelastic strain recovery measurement of cores at great depth. *Tectonophysics*, 426 (1 - 2): 221 - 238
- Lin W. 2007. Current stress state and principal stress rotations in the vicinity of the Chelungpu fault induced by the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L16307, doi:10.1029/2007GL030515
- Lin W, Yeh EC, Ito H, Hirono T, Soh W, Wang CY, Ma KF, Hung JH and Song SR. 2007. Preliminary results of stress measurement using drill cores of TCDP hole-A: An application of Anelastic Strain recovery method to three-dimensional in-situ stress determination. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 18 (2): 379 - 393
- Lin WR. 2008. A core-based method to determine three-dimensional in-situ stress in deep drilling wells; Anelastic strain recovery technique. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27 (12): 2387 - 2394 (in Chinese with English abstract)

- Liu J, Zhang ZH, Li W, Jie X, Xing XC, Hu GY, Xu Q, Tapponnier P, Zeng LS, Ding L and Liu YL. 2008. The M_s 8.0 Wenchuan Earthquake co-seismic rupture and its tectonic implications: An out-of-sequence thrusting event with slip partitioned on multiple faults. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1707–1722 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Luo ZL and Dai SL. 1995. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin. *Acta Geologica Sinica*, 69(3): 205–214 (in Chinese with English abstract)
- Liu SG, Luo ZL, Zhao XK, Xu GS, Wang GZ and Zhang CJ. 2003. Coupling relationships of sedimentary basin-orogenic belt systems and their dynamic models in West China: A case study of the Longmenshan Orogenic belt-West Sichuan foreland basin system. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 177–186 (in Chinese with English abstract)
- Lou H, Wang CY, Lü ZY, Yao ZX, Dai SS and You HC. 2008. Deep tectonic setting of the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake in southwestern China: Joint analysis of teleseismic P-wave receiver functions and Bouguer gravity anomalies. *Science in China (Series D)*, 52(2): 166–179 (in Chinese)
- Major National Science and Engineering “Crustal Movement Observation Network of China” Project Group (MNSE “CMONC” PG). 2008. GPS coseismic displacement field for the M_s Wenchuan earthquake, 2008. *Science in China (Series D)*, 38(10): 1195–1206 (in Chinese)
- Matsuki K. 1991. Three-dimensional in-situ stress measurement with anelastic strain recovery of a rock core. In: Wittke W (ed.). *Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech*, Aachen, 1: 557–560
- Matsuki K and Takeuchi K. 1993. Three-dimensional in-situ stress determination by anelastic strain recovery of a rock core. *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, 30: 1019–1022
- National Earthquake Expert Committee. 2008. *Wenchuan Earthquake-geological Disasters Atlas*. Beijing: Map Publishing House (in Chinese)
- Peng H, Ma XM and Jiang JJ. 2009. Stability and stress measurement near the Qingchuan fault in the northern Longmen Mountains. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 114–130 (in Chinese with English abstract)
- Royden LH, Burchfiel BC, King RW *et al.* 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet. *Science*, 276(5313): 788–790
- Tapponnier P, Xu ZQ, Roger F, Meter B, Arnaud N, Wittlinger G and Yang JS. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. *Science*, 294(23): 1671–1677
- Teng JW, Liu C, Han LG, Ruan XM, Yan YF and Zhang YQ. 2009. The dynamical mechanism for medium rapture and motion of deep matter on Wenchuan-Yingxiu M_s 8.0 Earthquake, 2008. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(4): 559–583 (in Chinese with English abstract)
- USGS. 2008. <http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes/us2008ryan.php>
- Wang LJ, Zhang LR and Wang W. 1993. Deep crustal stress measurement by borehole breakouts. In: *Science Papers on Hydrogeology, Engineering Geology and Environmental Geology*. Beijing: Seismological Press, 63–69 (in Chinese)
- Wang LJ, Cui JW, Zhou CJ, Sun DS, Wang W, Tang ZM and Qian HS. 2009. Numerical modeling for Wenchuan Earthquake mechanism. *Journal of Geomechanics*, 15(2): 105–113 (in Chinese with English abstract)
- Wang LJ, Sun DS, Lin WR, Cui JW, Peng H, Gao L, Wang W and Qiao ZJ. 2012. Anelastic strain recovery method to determine in-situ stress and application example. *Chinese J. Geophys.*, 55(5): 1674–1681 (in Chinese with English abstract)
- Wu JP, Huang Y, Zhang TZ, Ming YD and Fang LH. 2009. Aftershock distribution of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake and three dimensional P-wave velocity structure in and around Source region. *Chinese J. Geophys.*, 52(2): 320–328 (in Chinese with English abstract)
- Wu ML, Zhang YQ, Liao CT, Chen QC, Ma YS, Wu JS, Yan JF and Ou MY. 2009. Preliminary results of In-situ stress measurements along the Longmenshan fault zone after the Wenchuan M_s 8.0 Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 83(4): 746–753
- Xu ZH. 2001. A present-day tectonic stress map for Eastern Asia region. *Acta Seismologica Sinica*, 23(5): 492–501 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Hou LW and Wang ZX. 1992. *Orogenic Processes of the Songpan-Garze Orogenic Belt of China*. Beijing: Geological Publishing House, 1–190 (in Chinese)
- Xu ZQ, Li HB and Yang JS. 2006. An orogenic plateau: The orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 1–17 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Li HB, Hou LW, Fu XF, Chen W, Cai ZH and Chen FY. 2007. Uplift of Longmen-Jinping orogenic belt along the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau: Large-scale detachment faulting and extrusion mechanism. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1262–1276 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Ji SC, Li HB, Hou LW, Fu XF and Cai ZH. 2008. Uplift of the Longmen Shan range and the Wenchuan earthquake. *Episodes Journal of International Geoscience (IUGS)*, 31(3): 291–301
- Xu ZQ, Li HB and Wu ZL. 2008. Wenchuan earthquake and scientific drilling. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1613–1622 (in Chinese with English abstract)
- Zhang PZ, Wang Q and Ma ZJ. 2002. GPS velocity field and active crustal deformation in and around the Qinghai-Tibet Plateau. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 442–450 (in Chinese with English abstract)
- Zhang YQ, Yang N, Shi W and Dong SW. 2008. Neotectonics of eastern Tibet and its control on the Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1668–1678 (in Chinese with English abstract)
- Zhu YT, Wang XB, Yu NA, Gao SQ, Li K and Shi YJ. 2008. Deep structure of magnetotelluric profile on Longmen Mts. and its relation to the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 82(12): 1623–1643 (in Chinese with English abstract)
- Zoback MD, Moos D and Mastin L. 1985. Well bore breakouts and in situ stress. *Journal of Geophysical Research*, 90(B7): 5523–5530
- Zoback MD and Harjes HP. 1997. Injection-induced earthquakes and crustal stress at 9km depth at the KTB deep drilling site, Germany. *Journal of Geophysical Research*, 102(B8): 18477–18491

附中文参考文献

- 安其美, 丁立丰, 王海忠, 赵仕广. 2004. 龙门山断裂带的性质与活动性研究. *大地测量与地球动力学*, 24(2): 115–119
- 陈九辉, 刘启元, 李顺成, 郭飏, 李昱, 王峻, 齐少华. 2009. 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*, 52(2): 390–397
- 陈运泰. 2008. 汶川特大地震的震级和断层长度. *科技导报*, 26(10): 26–27
- 陈运泰, 许力生, 张永等. 2008. 2008年5月12日汶川特大地震震源特征分析报告. <http://www.csi.ca.cn/sichuan/chenyuntai.pdf>
- 崔军文, 唐哲民, 邓进福, 岳永君, 孟令顺, 余钦范. 1999. 阿尔金山断裂系. 北京: 地质出版社, 1–249
- 崔军文, 张晓卫, 唐哲民. 2006. 青藏高原的构造分区及其边界的变形构造特征. *中国地质*, 33(2): 256–267
- 杜义, 谢富仁, 张效亮, 荆振杰. 2009. 汶川 M_s 8.0 级地震断层滑动机制研究. *地球物理学报*, 52(2): 464–473
- 付小方, 侯立玮, 李海兵, 王宗秀, 邹付戈. 2008. 汶川大地震 (M_s 8.0) 同震变形作用及其与地质灾害的关系. *地质学报*, 82

- (12): 1733 - 1746
- 国家地震专家委员会. 2008. 汶川地震-地质灾害图集. 北京: 地图出版社
- 国家重大科学工程“中国地壳运动观测网络”项目组. 2008. GPS 测定的2008年汶川 M_s 8.0级地震的位移场. 中国科学(D辑), 38(10): 1195 - 1206
- 洪时中, 徐吉廷. 2009. 历史将永远铭记他们——记在叠溪大地震的考察、研究和救灾工作中作出贡献的几位前辈. 国际地震动态, (2): 30 - 38
- 嵇少丞, 王茜, 孙圣思, 许志琴, 李海兵. 2008. 亚洲大陆陆逸构造与现今中国地震活动. 地质学报, 82(12): 1644 - 1667
- 李海兵, 付小方, van der Woerd J, 司家亮, 王宗秀, 侯立玮, 邱祝礼, 李宁, 吴富峒, 许志琴, Tapponnier P. 2008. 汶川地震(M_s 8.0)地表破裂及其同震右旋斜向逆冲作用. 地质学报, 82(12): 1623 - 1643
- 李四光. 1977. 论地震. 北京: 地质出版社, 1 - 160
- 李勇, 周荣军, Densmore AL, Ellis MA. 2006. 龙门山断裂带走滑方向的反转及其沉积与地貌标志. 矿物岩石, 26(4): 26 - 34
- 李勇, 周荣军, Alexander LD, 阎亮, Nicholas R, 董顺利, Michael AE, 张毅, 何玉林, 陈浩, 乔宝成, 马博琳. 2008. 映秀-汶川断裂的地表破裂与变形特征. 地质学报, 82(12): 1688 - 1706
- 林为人. 2008. 基于岩芯非弹性应变恢复量测定的深孔三维地应力测试方法. 岩石力学与工程学报, 27(12): 2387 - 2394
- 刘静, 张智慧, 文力, 孙杰, 邢秀臣, 胡古月, 许强, Tapponnier P, 曾令森, 丁林, 刘延乐. 2008. 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, 82(12): 1707 - 1722
- 刘树根, 罗志立, 戴苏兰. 1995. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降. 地质学报, 69(3): 205 - 214
- 刘树根, 罗志立, 赵锡奎, 徐国盛, 王国芝, 张成江. 2003. 中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式——以龙门山造山带-川西前陆盆地系统为例. 地质学报, 77(2): 177 - 186
- 楼海, 王椿镛, 吕智勇, 姚志祥, 戴仕贵, 尤惠川. 2008. 2008年汶川 M_s 8.0级地震的深部构造环境——远震P波接收函数和布格重力异常的联合解释. 中国科学(D辑), 38(10): 1207 - 1220
- 彭华, 马秀敏, 姜景捷. 2009. 龙门山北端青川断层附近应力测量与断层稳定性. 地质力学学报, 15(2): 114 - 130
- 滕吉文, 刘财, 韩立国, 阮小敏, 闫雅芬, 张永谦. 2009. 汶川-映秀 M_s 8.0地震的介质破裂与深部物质运移的动力机制. 吉林大学学报(地球科学版), 39(4): 559 - 583
- 王连捷, 张利容, 王薇. 1993. 利用钻孔崩落法确定深部地应力状态. 见: 工程地质, 水文地质, 环境地质论文集. 北京: 地震出版社, 63 - 69
- 王连捷, 崔军文, 周春景, 孙东生, 王薇, 唐哲民, 钱华山. 2009. 汶川5.12地震发震机理的数值模拟. 地质力学学报, 15(2): 105 - 113
- 王连捷, 孙东生, 林为人, 崔军文, 彭华, 高禄, 王薇, 唐哲民, 乔子江. 2012. 地应力测量的非弹性应变恢复法及应用实例. 地球物理学报, 55(5): 1674 - 1681
- 吴建平, 黄媛, 张天中, 明跃红, 房立华. 2009. 汶川 M_s 8.0级地震余震分布及周边区域P波三维速度结构研究. 地球物理学报, 52(2): 320 - 328
- 许忠淮. 2001. 东亚地区现今构造应力图的编制. 地震学报, 23(5): 492 - 501
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀等. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 1 - 190
- 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 2006. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型. 地学前缘, 13(4): 1 - 17
- 许志琴, 李化启, 侯立玮, 付小芳, 陈文, 曾令森, 蔡志慧, 陈方远. 2007. 青藏高原东缘龙门-锦屏造山带的崛起——大型拆离断层和挤出机制. 地质通报, 26(10): 1262 - 1276
- 许志琴, 李海兵, 吴忠良. 2008. 汶川地震和科学钻探. 地质学报, 82(12): 1613 - 1622
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 青藏高原现今构造变形特征与GPS速度场. 地学前缘, 9(2): 442 - 450
- 张岳桥, 杨农, 施炜, 董树文. 2008. 青藏高原东缘新构造及其对汶川地震的控制作用. 地质学报, 82(12): 1668 - 1678
- 朱迎堂, 王绪本, 余年, 高树全, 李坤, 石岩峻. 2008. 龙门山大地电磁深部结构及汶川地震(M_s 8.0). 地质学报, 82(12): 1769 - 1777