

贺鹏超, 沈正康. 2014. 汶川地震发震断层破裂触发过程. 地球物理学报, 57(10):3308-3317, doi:10.6038/cjg20141018.
He P C, Shen Z K. 2014. Rupture triggering process of Wenchuan earthquake seismogenic faults. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(10):3308-3317, doi:10.6038/cjg20141018.

汶川地震发震断层破裂触发过程

贺鹏超¹, 沈正康^{1,2*}

1 北京大学地球与空间科学学院地球物理系, 北京 100871

2 美国加州大学洛杉矶分校地球与空间科学系, CA 90095-1567, USA

摘要 2008 年汶川大地震造成北川断裂、彭灌断裂、小渔洞断裂等多条断裂的破裂, 呈现出复杂的破裂过程. 对此, 以往地震学的研究没有对于各个发震断层的破裂先后顺序给出充分论证. 本文计算由于断层破裂在其他断层段上造成库仑应力的变化, 根据其相互触发关系确定断层可能的破裂顺序. 结果表明, 各断裂带可能的发震顺序为: 主震在北川断裂南端(小渔洞断裂以南的北川断裂虹口段)起始, 造成北川断裂的后续段落龙门山镇—清平段和彭灌断裂同时破裂, 进而触发小渔洞断裂发生破裂.

关键词 汶川地震; 几何模型; 同震破裂模型; 破裂触发; 库仑应力变化

doi:10.6038/cjg20141018

中图分类号 P315

收稿日期 2013-10-30, 2014-07-16 收修定稿

Rupture triggering process of Wenchuan earthquake seismogenic faults

HE Peng-Chao¹, SHEN Zheng-Kang^{1,2*}

1 Department of Geophysics, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2 Department of Earth and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California 90095-1567, USA

Abstract The 2008 Wenchuan earthquake ruptured several faults simultaneously, such as the Beichuan, Pengguan, and Xiaoyudong faults, in a very complicated process. Previous studies however, have not fully addressed the issue of rupture sequence of these faults. This paper calculates the Coulomb failure stress changes on fault planes induced by preceding fault ruptures of various scenarios to test the rupture sequence. Results show that the earthquake started at the Hongkou segment of the southern part of the Beichuan fault, followed by the Longmenshan Town-Qingping segment of the northern Beichuan fault and the Pengguan fault, and the Xiaoyudong fault was triggered the last.

Keywords Wenchuan earthquake; Geometry structure; Coseismic slip model; Rupture triggering; Coulomb failure stress change

1 引言

2008 年 5 月 12 日四川省汶川县发生了 $M_w 7.9$ ($M_s 8.0$) 地震. 该地震发生于四川盆地西北边缘的

龙门山逆冲断裂带上, 是青藏高原地壳物质缓慢的东向移动受到四川盆地和华南地块坚硬地壳阻挡的构造运动过程的一部分(万永革等, 2009). 本次地震中发生破裂的震源区断层主要有两个, 分别是北川断裂和彭县—灌县断裂(Shen et al., 2009), 以下

基金项目 国家自然科学基金项目(41090294)资助.

作者简介 贺鹏超, 男, 1989 年生, 2011 年获北京大学学士学位, 现为北京大学在读博士研究生. E-mail: hepengchaoslg@pku.edu.cn

*** 通讯作者** 沈正康, 男, 教授, 1990 年获美国加州大学洛杉矶分校地球物理博士学位, 主要从事卫星大地测量、地震学和地球动力学等方面的研究. E-mail: zhengkangshen@pku.edu.cn

用 BCF 和 PGF 表示。同时破裂的还有一个相对较小的断层,位于小渔洞到理县方向,与 BCF、PGF 近似正交,即小渔洞断裂(徐锡伟等,2008),以下用 XYD 表示。

对于这次地震,前人已经各个角度进行了不少研究,获得了有关发震构造、破裂过程等多方面成果。其中对汶川地震破裂过程的研究,通过地震学方法反演出破裂的时空演化过程(Chen et al., 2008; Ji and Hayes, 2008; 王卫民等, 2008; 张勇等, 2008)。但由于大多数是单一破裂面模型,即仅包括 BCF,所以只能给出一个总体的过程,而不能对若干个断层面(包括 PGF 和 XYD)的破裂顺序给出结果。这些反演结果一般表现为:破裂从北川断裂南端开始,沿北川断裂向东北方向单向扩展,在映秀和北川附近时分别出现约 4 s 的停滞,而整个破裂过程用时约 90 s(张勇等, 2008)。只有王卫民等(2008)同时反演了 PGF 的破裂过程,并认为 PGF 是在 BCF 的破裂传播到 PGF 南端与 BCF 的交汇处时开始破裂。与此同时,BCF 向北继续破裂。但这个结果并没有指出 XYD 何时开始破裂。

另有前人的研究对于地震破裂过程给出定性的推测。如陈桂华等(2009)认为,如果 BCF 与 PGF 的破裂以相同方式同时扩展,破裂可能只会其中一条断裂发展而在另一条停止;欲使两条平行断层都发生破裂,只能依赖于相邻的断层破裂,而 XYD 正是使两条断层中一条受到另一条触发的纽带。这意味着一种可能的情况是:随着 BCF 南端先破裂并传播到 XYD 处,以及 XYD 以北的 BCF 继续破裂,由于 XYD 南北两侧 BCF 错动程度的不一致(南面逆冲量大于北面逆冲量),导致 XYD 上下盘出现了左旋的差异运动,从而引发了 XYD 的破裂;而 XYD 的破裂也同时连通了 PGF,使得青藏高原地壳的东向运动能够作用到 PGF 上,从而进一步引发了 PGF 的破裂。

但这个过程究竟是否成立? 或者是否还有别的可能,比如 BCF 不通过 XYD 就可以触发 PGF? 这可以通过断层面上静库仑应力变化的计算来加以验证。

通过计算库仑应力变化评估本地区断层活动性变化,前人已获得一系列研究成果。如张秋文等(2004)以鲜水河断裂带为例,研究断层间应力相互作用对地震发生的影响,发现断层面上由于同震静库仑应力改变导致地震复发概率的改变可达 30.5% 以上,而且主震后的余震也大多发生于同震静库仑应

力增加较高的微破裂上。万永革等(2007)研究了发生在青藏高原东部 20 个 7 级以上大地震的应力演化和地震触发作用,发现 85% 的地震受到静库仑应力增加的触发作用。通过计算静库仑应力变化研究汶川地震断层破裂次序,钱琦和韩竹军(2010)已经做过这方面的尝试,得出 XYD 是汶川主震起始破裂断层面的结论。这与地震定位的结果(黄媛等, 2008; 陈九辉等, 2009; 杨智娴等, 2012)和根据 P 波初动解做出的主震震源机制解(胡幸平等, 2008)相悖。而且,其结论仅通过计算发震断层在接收断层地表以下 8 km 处的库仑应力变化做出,并没有对接收断层面的库仑应力变化做出计算和分析。

本文中我们将对各断层面上由于已破裂段落造成的静库仑应力变化加以计算,并以此来验证断层间的破裂顺序。最终结果表明,主震在 BCF 南端虹口段起始,造成 BCF 的后续段落龙门山镇—清平段和 PGF 同时破裂,进而触发 XYD 发生破裂。

2 断层破裂触发模型

地震的初始破裂发生后,随着破裂的扩展与地震波锋面的传播,相邻断层面上会经历应力场的静态变化与动态变化。这两种变化都有可能触发断层的进一步破裂,在研究中需要分析两种触发机制的特征及作用大小,从而认识何种机制会起到主导作用。

动态触发是地震波产生的直接触发,意味着地震波传播到的区域的应力场的突然改变超过断层面的承受极限而产生破裂。但由于这一应变是波动的,当一有限断层此刻受到触发作用时,其下一时刻因为应变的反向变化很快又会受到抑制作用。根据主频周期的不同,其变化时间在 0.1 s 至数秒范围。如果由于断层的流变性造成应变响应滞后于应力变化,触发不能在很短时间内完成,一旦波峰过去动态触发的机会也就过去。此外从空间上来说,地震波在断层面上产生波长尺度的正负应力变化,即瞬间产生正向应力扰动的空间范围有限,一旦波峰过去,同一区域会受到波谷应变反向的抑制。由于地震波产生应力变化的时空特征,因此在破裂前锋以外的区域,地震波造成的动态触发更容易产生微裂隙与微破裂。而一旦地震波传播已经过去,动态库仑应力变化即不再存在,除非断层已经处于趋于破裂的极限状态,否则很难造成断层面的大尺度触发破裂。如 Scholz(1998)认为由于动态应力变化所影响的区

域大小有限,持续时间短暂(尤其在近场,地震波频率更高),因此不足以触发地震。

与此相对应,静态触发是在地震波传播过之后,在破裂区临域产生的静态库仑应力改变所造成。这一改变可以造成破裂周边断层面上大尺度范围库仑应力的持续、显著增加;当某一处被触发破裂后,容易扩展到邻近区域,继而造成整个断层面的破裂。

许多研究和观测表明,地震的动态触发主要在中远场起作用(Anderson et al., 1994; Hill et al., 1993, 1995; Gomberg and Davis, 1996),而在近场,地震的触发主要是受到静态应力变化的影响而非动态。这是因为静态库仑应力变化和动态库仑应力变化随空间的衰减速率不同,静态库仑应力变化随空间的衰减速率在 $1/r$ 和 $1/r^2$ 之间(r 为观测点与震源间距离),而动态库仑应力变化随空间的衰减速率小于 $1/r$ (Cotton and Coutant, 1997)。因此,中远场地震的触发主要是动态应力变化的影响。另外一方面,由于远场应力变化的频率相对较低,因此相对近场有更长的持续作用时间,也增加了远场动态触发的可能性。

研究应力变化对地震的触发影响除了考虑弹性的库仑破裂模型外,许多研究也使用可以表征地球介质流变学性质的速率状态相依的摩擦定律来计算断裂带应力场变化及其对地震的触发效应(Gomberg et al., 1997, 1998, 2000; Belardinelli et al., 2003)。这类模型关于动态和静态应力变化对地震触发作用的对比研究表明,在同等程度上触发一个地震所需要的动态应力变化的幅度是静态应力变化的 10~100 倍(Gomberg et al., 1998; Kilb et al., 2002; Belardinelli et al., 2003)(火山、地热区是例外,这些地区由于大量流体的存在造成断层强度明显偏低,流变弛豫时间短,故动态触发相对容易,效应也更明显);而在近场,静态应力变化和动态应力变化的幅度接近(Kilb et al., 2002),因此近场的地震触发更可能是静态应力变化触发的结果。

基于以上考虑,我们认为不同断层之间或同一断层的不同段落之间的触发破裂更可能是静态触发而不是动态触发,这也是本文推断汶川地震断层破裂次序的基本假定之一。因此,本文选择通过计算静态库仑应力变化来推断汶川地震的断层破裂次序。

3 断层几何及破裂模型的选择和构建

前人的研究已经提供了许多汶川地震的破裂模

型。主要根据地震波数据的有 Ji 和 Hayes(2008),王卫民等(2008)。根据大地测量数据的有 Hashimoto 等(2009),Shen 等(2009),Feng 等(2010),Tong 等(2010),Wang 等(2011)。根据野外地质观测及地震勘探数据有徐锡伟等(2008),Jia 等(2009)等。以上模型多数为给定断层几何形状,反演破裂在断层面的分布。对于我们的研究来说,断层几何与破裂模型对于同震应力场的计算同样重要。故我们仅对同时约束反演断层几何和破裂分布的模型进行分析,从中选出适用模型,包括有 Shen 等(2009)根据大地测量数据反演得到和徐锡伟等(2008)及 Jia 等(2009)根据野外地质观测和地震勘探资料得到的模型。

Shen 等(2009)与徐锡伟等(2008)的模型比较接近,主要特征是:BCF 的产状分段特征明显。比如,根据徐锡伟等(2008),BCF 可以分为虹口、龙门山镇—清平和北川—南坝等三个次级破裂段。而 Shen 等(2009)进一步给出断层倾角由南向北逐渐变陡,西南段倾角 43° ,南坝处增加到 50° ,南坝以北变为 56° ,到最北端则接近垂直。与断层产状分段特征相应的是同震滑移分布也呈现出分段特征:虹口段和龙门山镇—清平段以逆冲为主,兼具右旋走滑分量,其中平均逆冲位错为 3~4 m,平均右旋走滑位错为 2 ± 0.5 m,北川—南坝段以右旋走滑为主,兼具逆冲分量,其中平均走滑位错为 2~3 m,平均逆冲位错为 1~2 m(徐锡伟等,2008)。这可能是由于岷江—虎牙断裂(图 1)参与了本地区的应变分配,吸收了北部地区部分的東西向地壳缩短,使得 BCF 东北段跨断层缩短减少,形变以右旋走滑为主,因此在 BCF 东北部产生了高倾角的同震破裂面。

与上述模型不同的是 Jia 等(2009)和 Li 等(2010)根据石油地震勘探剖面给出的 BCF 几何模型,该结果认为 BCF 南段倾角 $30^\circ \sim 45^\circ$,北段减小到 $20^\circ \sim 30^\circ$,即认为 BCF 北段为缓倾角。这与前述两种模型给出的 BCF 北段近垂直的结论相左。考虑到利用反射波信号探测地层结构,对深部地层中倾角较小的断层面一般可以给出相对准确的结果;但对于较陡的断层面,由于来自该断层面的反射信号难以返回地表,尤其对于近垂直的断层面可能几乎接收不到清晰的反射信号,所以该方法对于近垂直的断层面的识别会有较大误差。而该方法所检测到的深部地层边界的反射面,很可能是早期地质构造活动时产生的,而非 5·12 汶川地震的同震破裂面,所以以该反射面位置确定本次地震的同震破裂

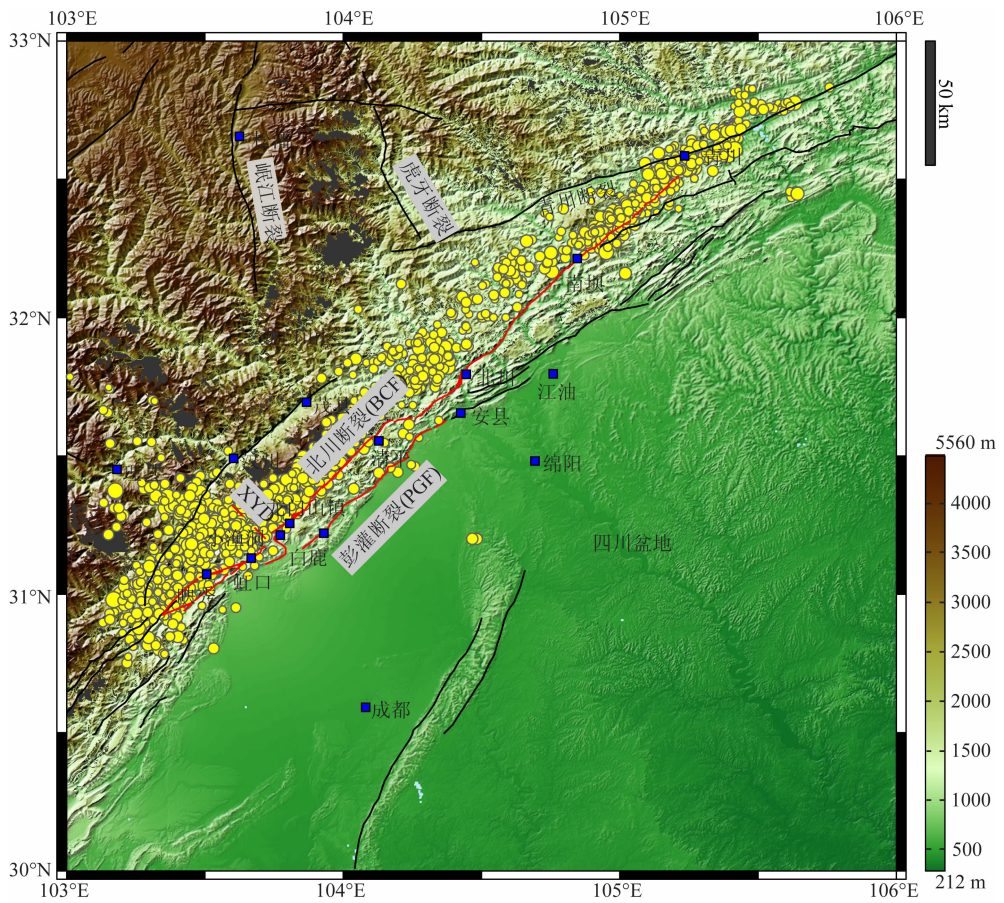


图 1 龙门山断裂周围断层分布图

红线为 BCF、PGF、XYD(虚线表示 XYD 隐伏段落),黑线为区域内其他断裂,
黄色圆点表示 2008 年 5 月 12 日—6 月 26 日 $M>4.7$ 的余震.

Fig. 1 The distribution of faults around the Longmenshan fault

The red lines indicate BCF,PGF,XYD (the dashed line indicates buried XYD segment). The black lines indicate other faults
in the region. The yellow circles show $M>4.7$ aftershocks 12 May—26 June, 2008.

面位置,证据不够充分. 除此之外,胡幸平等(2008)利用 P 波初动资料求解出的余震震源机制解显示,BCF 北段发生的余震震源机制解普遍表现出高倾角特征. 因此,我们认为根据大地测量数据反演的结果和野外地质考察得到的模型更接近真实情况.

最终我们选择 Shen 等(2009)根据大地测量数据反演得到的结果作为 BCF 和 PGF 的几何模型(图 2). 而 XYD 则参考钱琦和韩竹军(2010)根据徐锡伟等(2008)和陈桂华等(2009)的地表实测记录构造的 XYD 简单模型,将 XYD 分为东南部分和西北部分:其东南段出露于地表,这与地表观测相符,而西北段隐伏于地表 2 km 以下,这主要是根据余震分布条带所作的推测;滑动量则根据实测数据加以平均;倾角设为 35° 和 70° 两种情况. 35° 是钱琦等(2010)根据野外实测记录(徐锡伟等,2008;陈桂华等,2009)得到的结果,而 70° 的选择是根据 P 波初动资料得到的余震震源机制解显示发生在 XYD 上

的余震主要为高倾角(胡幸平等,2008).

考虑到 PGF 实际存在范围不仅限于本次产生破裂部分,在西南方向还有数十千米的延伸,我们在 Shen 等(2009)模型基础上增加 PGF 西南段. 增加的一段在计算断层初始破裂对周边断层的影响时加以考虑,计算其库仑应力变化,验证其没有发生破裂的原因(图 3).

此外,Shen 等(2009)原模型中 BCF 深部 20 km 以下的水平断层面更可能主要是震后破裂而非同震破裂,因此在计算库仑应力变化时不予考虑.

4 库仑应力变化计算

4.1 原理和方法

库仑应力变化可以用来描述断层破裂危险性:库仑应力变化为正意味着该断层破裂的危险性增加;反之,库仑应力变化为负意味着危险性减小. 其

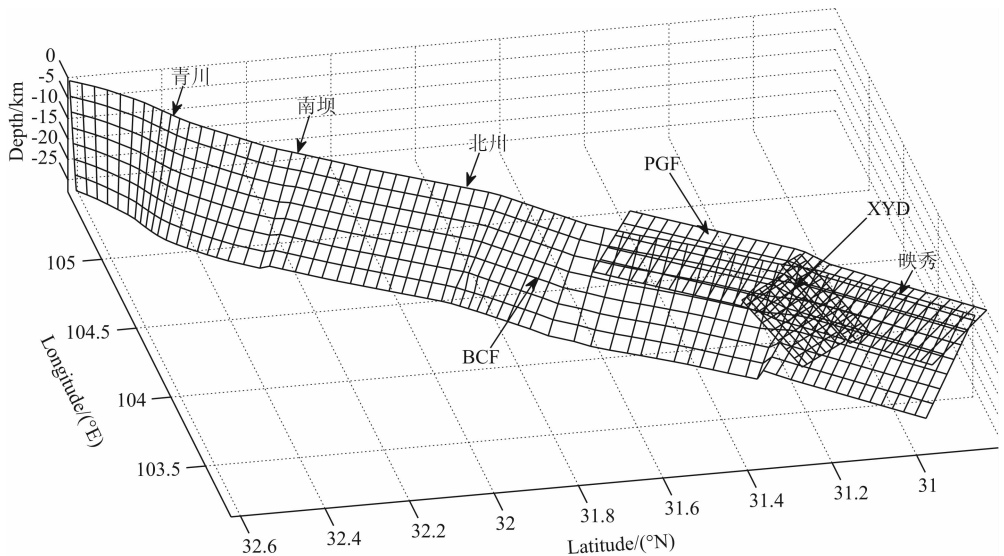


图 2 断层几何模型
Fig. 2 Fault geometry model

原理是基于库仑破裂准则:

$$\tau_n = c_0 + \mu \sigma_n, \tag{1}$$

其中 τ_n 为断层面可以承受的最大剪应力大小, c_0 为黏滞力, 即初始内摩擦力, μ 为内摩擦系数, σ_n 为断层面的正应力, 以压缩为正. 如果考虑到流体压力等的影响, 公式变为:

$$\tau_n = c_0 + \mu(\sigma_n - \Delta p), \tag{2}$$

其中 Δp 为孔隙压力. 或者公式仍不变, 而把 σ_n 称为有效正应力, μ 称为有效摩擦系数.

当一个大地震发生时, 会导致它邻近的断层面的正应力和剪应力同时发生变化. 例如, 正应力增加 $\Delta\sigma_n$, 这意味着该断层面上可承受的最大剪切应力增加 $\mu\Delta\sigma_n$; 与此同时, 如果该断层面的剪应力也增加了 $\Delta\tau_n$, 需要比较 $\Delta\tau_n$ 与 $\mu\Delta\sigma_n$ 的差值来判断库仑应力的变化, 如果 $\Delta\tau_n - \mu\Delta\sigma_n > 0$, 意味着断层破裂危险性增加, 反之, 断层更加安全.

这里 $\Delta\tau_n - \mu\Delta\sigma_n$ 被定义为库仑应力变化(Coulomb Failure Stress Change), 表示为

$$\Delta CFS = \Delta\tau_n - \mu\Delta\sigma_n. \tag{3}$$

如果在一次大地震期间, 各个发震断层或同一断层的不同段落之间的破裂触发是伴随着库仑应力的变化而产生, 那么我们可以通过计算各个发震断层面或不同段落间相互的库仑应力变化影响来验证几个发震断层的破裂顺序.

关于库仑应力变化的计算, 首先, 通过公式(3)计算接收断层面的正应力变化和优势滑移方向上的剪应力变化. 这需要给出断层面的法向矢量和优势滑移方向矢量, 以及其他断层元破裂在断层面上

产生的同震应力场变化. 断层面法向矢量可由接收断层的产状得出, 设为 $\mathbf{n}(n_1, n_2, n_3)$; 优势滑移方向是初始构造应力作用下断层的滑动趋势方向, 可用断层的实际滑移方向矢量表示, 设为 $\mathbf{s}(s_1, s_2, s_3)$; 同震应力场变化是地震造成的扰动应力场, 设为 $\Delta\sigma_{ij}$, 可以通过 Okada 弹性半无限空间理论位错模型来计算(Okada, 1985, 1992)——先利用 Okada 程序计算已发生破裂断层元在未发生破裂断层元处的同震应变场变化, 根据本构关系即可求得同震应力场变化 $\Delta\sigma_{ij}$. 因此, 将 $\Delta\sigma_{ij}$ 在断层面的法向矢量和优势滑移方向上投影即可求得断层面的正应力变化 $\Delta\sigma_n$ 和优势滑移方向上的剪应力变化 $\Delta\tau_n$, 由(3)式得到库仑应力变化 ΔCFS . 计算中杨氏模量取为 75 GPa, 泊松比为 0.25(石耀霖和曹建玲, 2010), 有效摩擦系数取为 0.4(King et al., 1994; 万永革等, 2009).

4.2 计算结果与讨论

首先, 我们以小渔洞以南的 BCF(虹口段)为发震断层, 分别以 BCF 的后续段落、XYD(倾角为 35°)、PGF 及 PGF 在西南端的延伸段落为接收断层计算库仑应力变化.

由图 3 可以看到, BCF 起始段虹口段对后续的 BCF 段落有明显的触发作用. 以往的研究表明, 静库仑应力变化触发地震的阈值一般为 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^5$ Pa(Aki, 1966; Kilb et al., 2001; 岳汉等, 2008), 因此当主震附近断层的库仑应力增加达 $(0.1 \sim 1.0) \times 10^5$ Pa 以上时, 就有可能对该处断层产生触发作用. 而从图 3 可以看到, 接收断层上靠近发震断层的段落, 其库仑应力变化都在 1.0×10^5 Pa 以上, 龙门山

镇—清平段落的余下部分也多有 0.5×10^5 Pa 以上的增加。这个结果也是在意料之中的,BCF 能发生级联型的破裂,前期的破裂在后续的断层面上一定是产生正的库仑应力变化的。

而 XYD 多数区域库仑应力变化为负,即 BCF 虹口段的破裂对 XYD 以抑制作用为主,只有 XYD

东南段近地表处,和西北段深部受到一定的触发作用。

在发生同震破裂的 PGF 东北段,库仑应力变化普遍为正值,且一半的区域都有 $(0.5 \sim 1) \times 10^5$ Pa 以上的增加。而且随着 BCF 的继续破裂,触发作用会迅速增强,所以很可能当 BCF 的破裂从南端传播

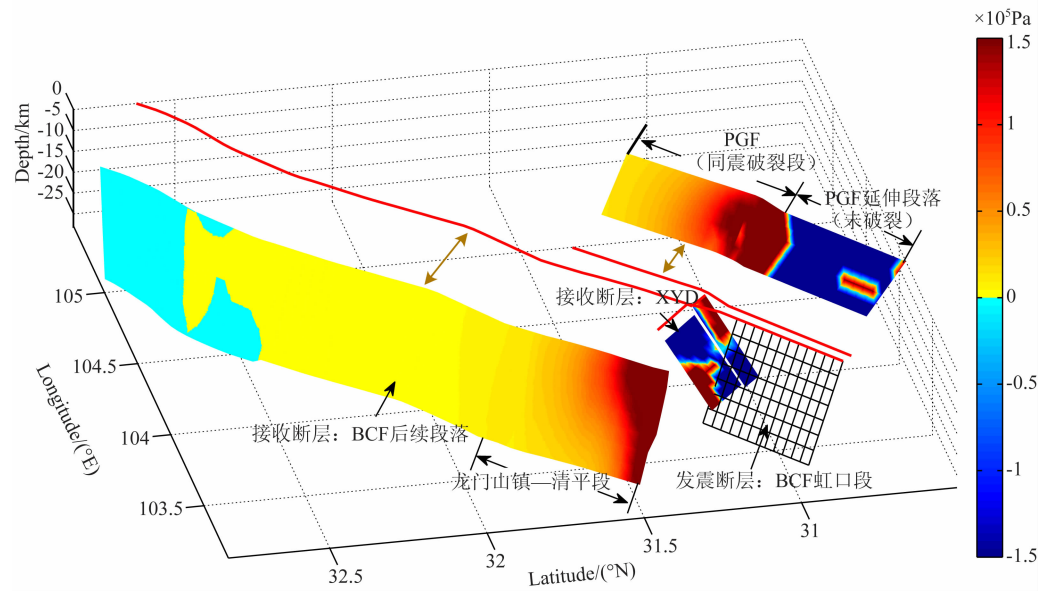


图 3 断层面上库仑应力计算结果。发震断层:BCF 虹口段;接收断层:BCF 后续段落、XYD、PGF 及 PGF 延伸段
红线为 BCF、PGF、XYD 断层出露于地表的迹线。色标表示接收断面上的库仑应力变化。
Fig. 3 Calculated Coulomb stress on faults. Slip fault: the Hongkou segment of BCF; Receiving fault: the subsequent segments of BCF,XYD,PGF and the extended PGF
The red lines indicate the fault surface traces of the BCF, PGF, and XYD faults.
Colors indicate the Coulomb Failure Stress Change on receiving faults.

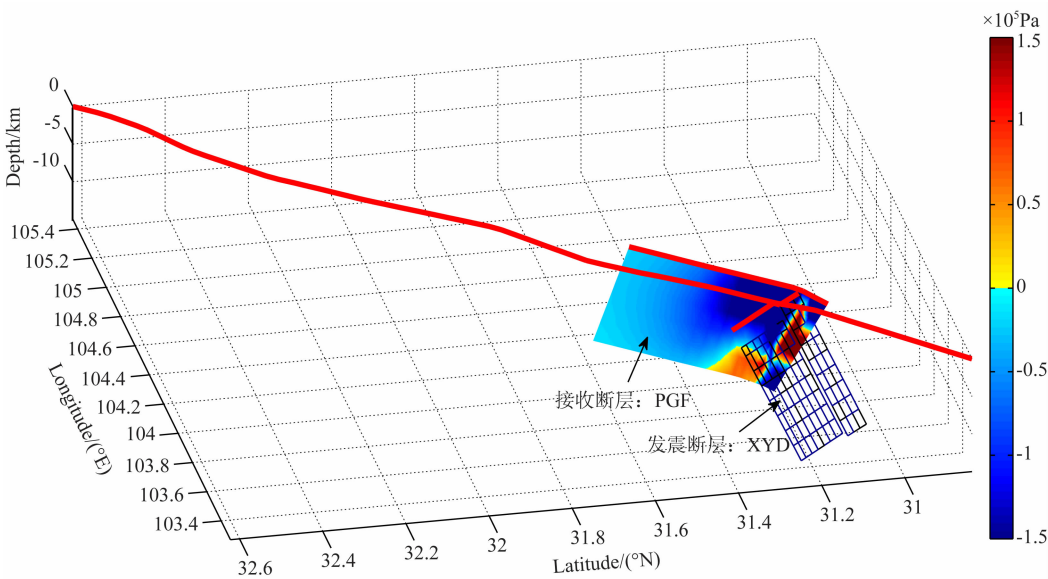


图 4 断层面上库仑应力计算结果。发震断层:XYD;接收断层:PGF
红线为 BCF、PGF、XYD 断层出露于地表的迹线。色标表示接收断层的库仑应力变化。
Fig. 4 Calculated Coulomb stress on faults. Slip fault: XYD; Receiving fault:PGF
The red lines indicate the fault surface traces of the BCF, PGF, and XYD faults.
Colors indicate the Coulomb Failure Stress Change of receiving fault.

到 XYD 附近时,PGF 就已经被触发. 与此同时,PGF 西南端的延伸段落,即与 BCF 虹口段相对应的平行段落却受到明显的抑制,其库仑应力变化量级为 $(-10\sim-100)\times10^5$ Pa. 可见,随着 BCF 虹口

段的破裂,PGF 西南延伸段的应力大幅卸载,因此这一段落在本次地震中没有发生破裂.

综上所述,随着 BCF 虹口段的破裂,BCF 的后续段尤其是龙门山镇—清平段,以及 PGF 都受到强

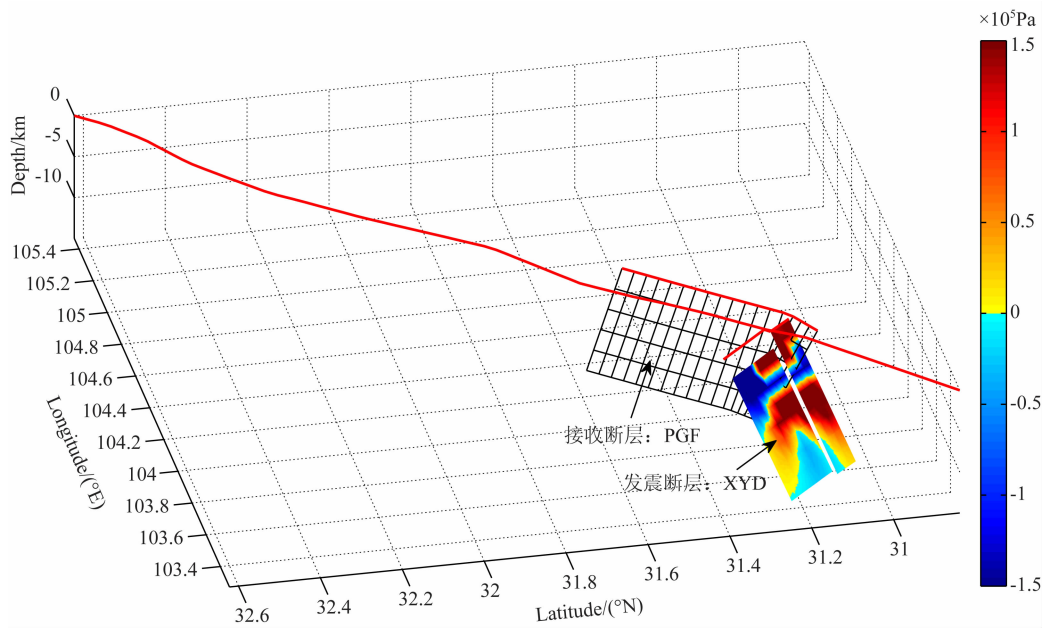


图 5 断层面上库仑应力计算结果. 发震断层:PGF;接收断层:XYD
红线为 BCF、PGF、XYD 断层出露于地表的迹线. 色标表示接收断层的库仑应力变化.
Fig. 5 Calculated Coulomb stress on faults. Slip fault: PGF; Receiving fault:XYD
The red lines indicate the fault surface traces of the BCF, PGF, and XYD faults.
Colors indicate the Coulomb Failure Stress Change of receiving fault.

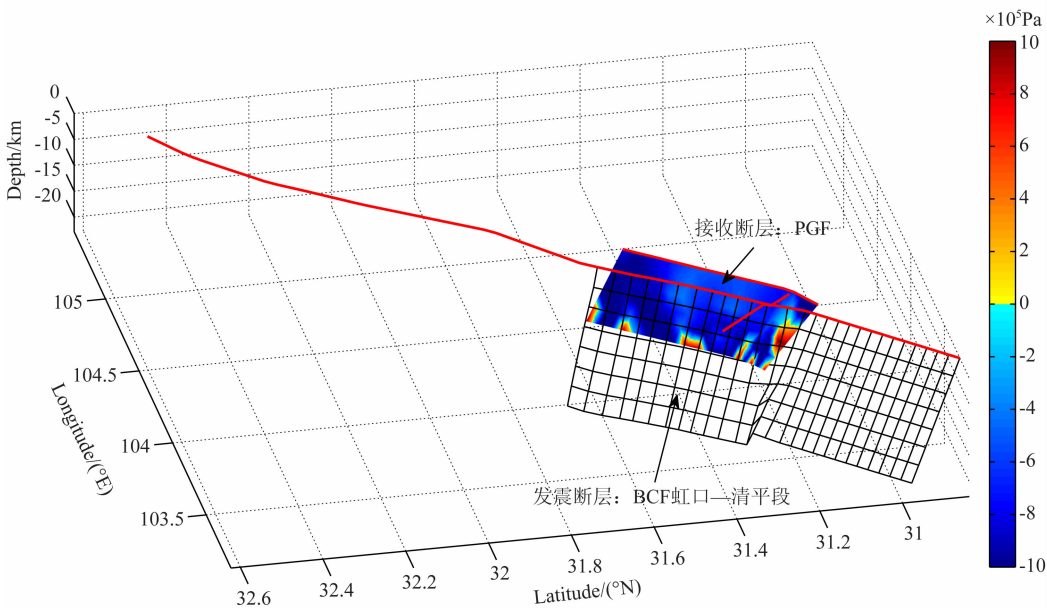


图 6 断层面上库仑应力计算结果. 发震断层:BCF 虹口段和龙门山镇—清平段;接收断层:PGF
红线为 BCF、PGF、XYD 断层出露于地表的迹线. 色标表示接收断层的库仑应力变化.
Fig. 6 Calculated Coulomb stress on faults. Slip fault: the Hongkou and Longmenshan Town-Qingping segments of the BCF;Receiving fault:PGF
The red lines indicate the fault surface traces of the BCF, PGF, and XYD faults.
Colors indicate the Coulomb Failure Stress Change of receiving fault.

烈的触发,很可能随之破裂,意味着 PGF 的破裂可能并不需要 XYD 的先行破裂作为“纽带”;而 XYD 受 BCF 虹口段破裂影响,只有在东南端的近地表和西北端的部分隐伏区域受到触发,而多数区域被抑制,因此其是否随之破裂并不确定。

为了进一步确定 PGF 的破裂是否需要 XYD 的破裂作为“纽带”,我们计算 PGF、XYD 的相互库仑应力变化影响。由图 4 可以看到,XYD 的破裂对 PGF 以抑制作用为主;而反过来,由图 5,PGF 的破裂则对 XYD 以触发作用为主。由此可以判断,XYD 的确不是触发 PGF 破裂的纽带,PGF 的破裂是由 BCF 的起始破裂段虹口段直接触发而发生的,XYD 的破裂、特别是大范围的破裂应在 PGF 开始破裂之后。

为了判断 PGF 的破裂时序关系,我们计算了 BCF 虹口段和其后续段(龙门山镇—清平段)均发生破裂后 PGF 上库仑应力的变化。由图 6 可以看到,BCF 的龙门山镇—清平段的破裂对于 PGF 起了几乎完全的抑制作用,这说明 PGF 的破裂起始时刻应当不晚于 BCF 龙门山镇—清平段开始破裂的时刻,也就是在 XYD 开始破裂之前。这进一步说明了 PGF 的破裂不需要 XYD 的破裂作为纽带。

除此之外,我们也分别计算了以 XYD、PGF 为初始破裂的情况,发现两者在 BCF 的南段和中段产生的库仑应力变化都以负值为主,所以这也从另一个方面肯定了初始破裂位于 BCF 的结论。

以上都是 XYD 倾角为 35° 时的结果,XYD 倾角为 70° 时,结果与之类似。

综合以上分析,根据库仑应力的计算结果,结合我们之前对破裂顺序的推测,得到的结论是:BCF 西南段的虹口段为起始破裂段,之后 BCF 的后续段(龙门山镇—清平段)和 PGF 都受到触发作用并发生破裂,之后伴随有 XYD 的破裂。

5 结论

本文基于前人对汶川地震破裂过程的研究,根据断层破裂引起周边断层上库仑应力变化的计算,提出了各发震断层可能的破裂顺序。选取了 Shen 等(2009)通过大地测量数据反演得到的破裂模型,并近似构造了 XYD 的破裂模型来进行库仑应力变化的计算。

本文研究的核心问题之一是 XYD 是否为 BCF 触发 PGF 破裂的纽带? 经过对断层间相互触发作

用即库仑应力变化的定量计算,最后得到,PGF 东北段的破裂并不需要 XYD 的破裂作为传递的纽带,即 BCF 的破裂可以直接触发 PGF 东北段的破裂,而 PGF 的破裂对 XYD 的破裂反而以触发作用为主。因此,关于本次地震各发震断层的破裂顺序为:BCF 西南段虹口段为起始破裂段,受其影响与 BCF 虹口段平行的 PGF 西南延伸段发生显著卸载未发生破裂,而 BCF 的后续段(龙门山镇—清平段)和 PGF 东北段都受到触发作用并发生破裂,之后伴随有 XYD 的破裂。

致谢 在论文完成过程中,和王康、耿万里、刘敦宇等进行了有益的讨论,在此表示感谢。二位评审人与编辑给出的评审意见有助于论文的修改,在此一并表示感谢。

References

- Aki K. 1966. Earthquake generating stress in Japan for the years 1961 to 1963 obtained by smoothing the first motion radiation patterns. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 44: 447-471.
- Anderson J G, Brune J N, Louie J N, et al. 1994. Seismicity in the western Great Basin apparently triggered by the Landers, California, earthquake, 28 June 1992. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(3): 863-891.
- Belardinelli M E, Bizzarri A, Cocco M. 2003. Earthquake triggering by static and dynamic stress changes. *J. Geophys. Res.*, 108 (B3), doi: 10.1029/2002JB001779.
- Chen G H, Xu X W, Yu G H, et al. 2009. Co-seismic slip and slip partitioning of multi-faults during the $M_s 8.0$ 2008 Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(5): 1384-1394.
- Chen J, Shao G F, Zhong L, et al. 2008. Rupture history of the May 12, 2008 $M_w 8$ Wenchuan Earthquake: An updated. // 2008 Bilateral Workshop under the Sino-US Earthquake Studies Protocol. Boulder, Colorado, USA.
- Chen J H, Liu Q Y, Li S C, et al. 2009. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(2): 390-397.
- Cotton F, Coutant O. 1997. Dynamic stress variations due to shear faults in a plane-layered medium. *Geophys. J. Int.*, 128(3): 676-688.
- Feng G C, Hetland E A, Ding X L, et al. 2010. Coseismic fault slip of the 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake estimated from InSAR and GPS measurements. *Geophys. Res. Lett.*, 37(1): L01302, doi: 10.1029/2009GL041213.
- Gomberg J, Davis S. 1996. Stress/strain changes and triggered seismicity at the Geysers, California. *J. Geophys. Res.*, 101 (B1): 733-749.
- Gomberg J, Blanpied M L, Beeler N M. 1997. Transient triggering

- of near and distant earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87 (2): 294-309.
- Gomberg J, Beeler N M, Blanpied M L, et al. 1998. Earthquake triggering by transient and static deformations. *J. Geophys. Res.*, 103(B10): 24411-24426.
- Gomberg J, Beeler N, Blanpied M. 2000. On rate-state and Coulomb failure models. *J. Geophys. Res.*, 105(B4): 7857-7871.
- Hashimoto M, Enomoto M, Fukushima Y. 2009. Coseismic deformation from the 2008 Wenchuan, China, earthquake derived from ALOS/PALSAR images. *Tectonophysics*, 491(1-4): 59-71, doi: 10.1016/j.tecto.2009.08.034.
- Hill D P, Reasenber P A, Michael A, et al. 1993. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. *Science*, 260(5114): 1617-1623.
- Hill D P, Johnston M J S, Langbein J O, et al. 1995. Response of Long Valley caldera to the $M_w=7.3$ Landers, California, earthquake. *J. Geophys. Res.*, 100(B7): 12985-13005.
- Hu X P, Yu C Q, Tao K, et al. 2008. Focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake and its strong aftershocks obtained from initial P wave polarity analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51 (6): 1711-1718.
- Huang Y, Wu J P, Zhang T Z, et al. 2008. Relocation of the $M_8.0$ Wenchuan earthquake and its aftershock sequence. *Science in China (Series D: Earth Science)*, 51(12): 1703-1711.
- Ji C, Hayes G. 2008. Preliminary result of the May 12, 2008 $M_w7.9$ eastern Sichuan, China earthquake. US Geol. Surv.
- Jia D, Li Y Q, Lin A M, et al. 2009. Structural model of 2008 $M_w7.9$ Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China. *Tectonophysics*, 491(1-4): 174-184.
- Kilb D, Gomberg J, Bodin P. 2002. Aftershock triggering by complete Coulomb stress changes. *J. Geophys. Res.*, 107(B4), doi: 10.1029/2001JB000202.
- King G C P, Stein R S, Lin J. 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84(3): 935-953.
- Li Y Q, Jia D, Shaw J H, et al. 2010. Structural interpretation of the coseismic faults of the Wenchuan earthquake: Three-dimensional modeling of the Longmen Shan fold and thrust belt. *J. Geophys. Res.*, 115(B4), doi: 10.1029/2009JB006824.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75(4): 1135-1154.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 82(2): 1018-1040.
- Qian Q, Han Z J. 2010. Determination of the initial rupture of the 2008 Wenchuan $M_8.0$ earthquake from analysis of fault interaction during the main shock process. *Earth Science Frontier* (in Chinese), 17(5): 84-92.
- Scholz C H. 1998. Earthquakes and friction laws. *Nature*, 391 (6662): 37-42.
- Shen Z K, Sun J B, Zhang P Z, et al. 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake. *Nature Geosciences*, 2: 718-724.
- Shi Y L, Cao J L. 2010. Some aspects in static stress change calculation—case study on Wenchuan earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 53(1): 102-110.
- Tong X P, Sandwell D T, Fialko Y. 2010. Coseismic slip model of the 2008 Wenchuan earthquake derived from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, GPS, and field data. *J. Geophys. Res.*, 115(B4), B04314, doi: 10.1029/2009JB006625.
- Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. 2009. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 31(2): 128-139.
- Wan Y G, Shen Z K, Zeng Y H, et al. 2007. Evolution of cumulative Coulomb failure stress in northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its effect on large earthquake occurrence. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 29(2): 115-129.
- Wan Y G, Wu Z L, Zhou G W. 2000. "Stress triggering" between different rupture events in several earthquakes. *Acta Seismologica Sinica*, 13(6): 607-615.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al. 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan. *Nature Geoscience*, 4(9): 634-640, doi: 10.1038/ngeo1210.
- Wang W M, Zhao L F, Li J, et al. 2008. Rupture process of the $M_8.0$ Wenchuan earthquake of Sichuan, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 51(5): 1403-1410.
- Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. 2008. The $M_8.0$ Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure. *Seismology and Geology* (in Chinese), 30(3): 597-629.
- Yang Z X, Chen Y T, Su J P, et al. 2012. The hypocenter and origin time of the $M_w7.9$ Wenchuan earthquake of May 12, 2008. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 34(2): 127-136.
- Yue H, Zhang Z Q, Chen Y S. 2008. Interaction between adjacent left-lateral strike-slip faults and thrust faults: the 1976 Songpan earthquake sequence. *Chinese Science Bulletin*, 53(16): 2520-2526.
- Zhang Q W, Zhang P Z, Wang C, et al. 2004. Interaction of active faults and its effect on earthquake triggering and delaying. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 25(4): 483-488.
- Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. 2008. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 52(2): 145-154.

附中文参考文献

- 陈桂华, 徐锡伟, 于贵华等. 2009. 2008 年汶川 $M_8.0$ 地震多断裂破裂的近地表同震位移滑移及滑移分解. 地球物理学报, 52 (5): 1384-1394.
- 陈九辉, 刘启元, 李顺成等. 2009. 汶川 $M_8.0$ 地震余震序列重新定位及其地壳构造研究. 地球物理学报, 52(2): 390-397.
- 胡幸平, 俞春泉, 陶开等. 2008. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解. 地球物理学报, 51(6): 1711-1718.
- 黄媛, 吴建平, 张天中等. 2008. 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: 地球科学), 38(10): 1242-1249.

钱琦, 韩竹军. 2010. 汶川 $M_s8.0$ 级地震断层间相互作用及其对起始破裂段的启示. 地学前缘, 17(5): 84-92.

石耀霖, 曹建玲. 2010. 库仑应力计算及应用过程中若干问题的讨论——以汶川地震为例. 地球物理学报, 53(1): 102-110.

万永革, 沈正康, 盛书中等. 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, 31(2): 128-139.

万永革, 沈正康, 曾跃华等. 2007. 青藏高原东北部的库仑应力积累演化对大地震发生的影响. 地震学报, 29(2): 115-129.

万永革, 吴忠良, 周公威等. 2000. 几次复杂地震中不同破裂事件之间的“应力触发”问题. 地震学报, 22(6): 568-576.

王卫民, 赵连锋, 李娟等. 2008. 四川汶川 8.0 级地震震源过程. 地球物理学报, 51(5): 1403-1410.

徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等. 2008. 汶川 $M_s8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, 30(3): 597-629.

杨智娴, 陈运泰, 苏金蓉等. 2012. 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_w7.9$ 地震的震源位置与发震时刻. 地震学报, 34(2): 127-136.

岳汉, 张竹琪, 陈永顺. 2008. 相邻左旋走滑和逆冲断层之间的相互作用: 1976 年松潘震群. 科学通报, 53(13): 1582-1588.

张秋文, 张培震, 王乘等. 2004. 断层间相互作用的触震与缓震效应定量评价. 地球学报, 25(4): 483-488.

张勇, 冯万鹏, 许力生等. 2008. 2008 年汶川大地震的时空破裂过程. 中国科学(D 辑:地球科学), 38(10): 1186-1194.

(本文编辑 何燕)