

刘盼, 李平恩, 廖力, 2017. 从库仑破裂应力和余震分布角度探讨汶川地震和芦山地震的关系. 震灾防御技术, 12(1): 40—55. doi: 10.11899/zfy20170105

从库仑破裂应力和余震分布角度探讨 汶川地震和芦山地震的关系¹

刘 盼 李平恩 廖 力

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要 本文以龙门山及周边地区为研究对象, 考虑区域地质构造差异、主要活动断裂带、地表附加重力影响, 建立能反映地表起伏和岩石圈分层结构的龙门山地区三维粘弹性有限元模型。以地壳水平运动速率观测值为约束条件重建研究区现今构造背景应力场, 在此基础上分别模拟了汶川地震和芦山地震的发生机理。通过分析同震库仑破裂应力变化与余震空间分布的关系, 探讨了2次地震主震对余震的触发作用以及汶川地震对芦山地震的影响。研究表明, 汶川地震和芦山地震的余震大部分由其主震触发, 汶川地震对芦山地震的余震有约6.78%的触发作用。汶川地震的同震库仑破裂应力在芦山地震主震位置的增加值约为0.016MPa, 如果龙门山断裂带南段库仑破裂应力年累积速率按照 $0.4 \times 10^{-3} \sim 0.6 \times 10^{-3} \text{MPa} \cdot \text{a}^{-1}$ 计算, 汶川地震使芦山地震提前了约27—40年。计算还表明汶川地震和芦山地震的发生使鲜水河断裂带南段和虎牙断裂的库仑破裂应力增加, 这些断裂带在未来发生地震的可能性增加。

关键词: 龙门山断裂带 库仑破裂应力 余震分布 汶川地震 芦山地震 有限元方法

引言

龙门山断裂带位于青藏高原东缘和四川盆地交汇处。在不到5年时间内, 龙门山断裂带的中段和南段相继发生了2008年5月12日汶川 $M_S 8.0$ 地震和2013年4月20日芦山 $M_S 7.0$ 地震, 给人民的生命财产造成了巨大损失。地震发生后, 国内外学者从不同角度对这2次地震进行了深入研究。其中, 库仑破裂应力作为一个重要的指标, 在分析地震之间的相互关系、探讨震后断层应力水平的变化以及估算地震的发震周期方面具有独特的意义(Harris, 1998; Parsons等, 2008; 陈连旺等, 2008; 王辉等, 2008; 邵志刚等, 2010; 徐晶等, 2013; 李玉江等, 2013a; 2013b; 2014; Wang等, 2014; Jia等, 2014)。因此, 许多学者从库仑破裂应力角度研究地震的影响。Parsons等(2008)采用地震波反演得到的均匀弹性有限断层模型, 通过计算后发现汶川地震引起的同震应力变化使龙门山断裂带南段库仑破裂应力增加了0.1MPa, 该断裂带正是芦山地震发生的位置。Toda等(2008)和万永革等(2009)采用弹性位错模型分别计算了汶川地震后周围断层上库仑破裂应力的变化, 认为龙门山断裂北部和最南端、鲜水河断裂带南段、

1 基金项目 地震行业科研专项(201408014)和中国地震局地球物理研究所基本科研业务费(DQJB14C06)共同资助。

[收稿日期] 2016-04-25

[作者简介] 刘盼, 男, 生于1987年。硕士研究生。目前从事地球动力学数值模拟方面的研究。E-mail: liupan_0214@163.com

[通讯作者] 李平恩, 男, 生于1977年。副研究员。目前从事地球动力学数值模拟方面的研究。E-mail: pingen2000@163.com

岷江断裂的地震危险性增加。在此基础上,单斌等(2009)进一步考虑了地壳自重及分层结构。董培育等(2013)计算了芦山地震后周边断层的库仑应力变化。单斌等(2013)也采用同样的方法计算了汶川地震和芦山地震引起的同震和震后粘弹性松弛应力场变化,结果表明,汶川地震导致芦山地震震源处库仑破裂应力增加 $0.37\text{—}1.14\times 10^{-2}\text{MPa}$,汶川地震可能促进了芦山地震的发生。Wang 等(2014)采用三维粘弹性分层位错模型进行分析也得到了相同的结论。缪森等(2013)采用有限断层模型计算了汶川地震的静态库仑应力变化对芦山地震的影响以及芦山地震对余震的影响,指出芦山地震是由汶川地震触发造成的。

上述工作使人们对汶川和芦山这 2 次地震相互关系的认识取得了重要进展。然而在计算中,他们采用的弹性位错模型或有限断层模型都属于简单的物理模型,不能反映不同区域的地形、地质构造、介质性质以及在横向和纵向上的非均匀性等。对此问题,数值模拟方法则具有天然的优势。首先,它能根据已有的观测资料和研究结果建立更符合实际情况的物理模型;其次,能针对所研究的问题,通过调整参数进行数值实验,从而分析不同参数的影响。因此,许多学者采用数值模拟方法,通过建立合适的有限元模型计算同震库仑破裂应力,分析地震对周边地区的影响(Luo 等, 2010; Liu 等, 2014)。李玉江等(2013a)充分考虑地形差异和粘弹性松弛等因素,并用接触摩擦方法处理活动断裂,研究了汶川地震对周围断层的影响。随后,他又采用相同的方法进一步分析了芦山地震对川滇地区主要断裂带的同震加载和卸载效应(李玉江等, 2013b, 2014),但他没有讨论这 2 次地震之间的关系。

因此,本文采用数值模拟方法,根据地质构造、深部反演结果以及 GPS 观测资料等,建立能反映地表起伏和岩石圈分层结构的龙门山地区三维粘弹性有限元模型。采用 Maxwell 粘弹性本构关系模拟岩石圈在漫长的地质演化过程中的流变效应以及地震发生瞬间的弹性效应。以 GPS 观测值为约束条件重建研究区现今构造应力场。采用准静态方法依次模拟了汶川地震和芦山地震的发生过程。通过分析同震库仑破裂应力与余震分布的关系,探讨了这 2 次地震主震对余震的触发作用以及汶川地震对芦山地震的影响。最后计算了这 2 次地震的共同作用对周边断层应力变化的影响。

1 三维粘弹性有限元模型

1.1 模型的建立

根据龙门山地区的活动构造特征,本文选取 $101.5^{\circ}\text{—}106.8^{\circ}\text{E}$, $29^{\circ}\text{—}33.7^{\circ}\text{N}$ 的矩形范围为研究区域,如图 1 所示。三维模型包括了龙门山断裂带(后山、中央和前山断裂)、岷江断裂、虎牙断裂、龙日坝断裂、鲜水河断裂带南段等主要活动断裂,如图 2 所示。根据深部反演结果,青藏高原东缘和四川盆地在地壳厚度以及物性参数上存在巨大的差异,因此在横向上将模型分为东侧的青藏高原东缘和西侧的四川盆地 2 个地质部分。三维有限元模型沿纵向(Z 轴)从地表到地下 200km 共分为 5 层,分别是地表、上地壳、下地壳、岩石圈上地幔和软流圈上地幔,包含活动地块和主要断裂带 2 种地质单元。断层宽度大约取 5km,从地表至地下 20km,为简化起见,所有断层均为直立。由于研究区域不大,采用笛卡尔坐标系代替球坐标系进行计算,以东向为 X 轴正向,北向为 Y 轴正向,垂直向上为 Z 轴正向,采用 Guess-Kruger 投影算法将研究区的经纬度坐标投影为 XYZ 直角坐标。引入 ETOP 高程数据¹

1 <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

得到模型地表垂直方向坐标，根据 Moho 面深度值（来自 MapSIS 软件提供的陈学波关于中国及外围地区莫霍面深度分布图）得到地壳与地幔的分界面。为考虑地形附加的重力影响，

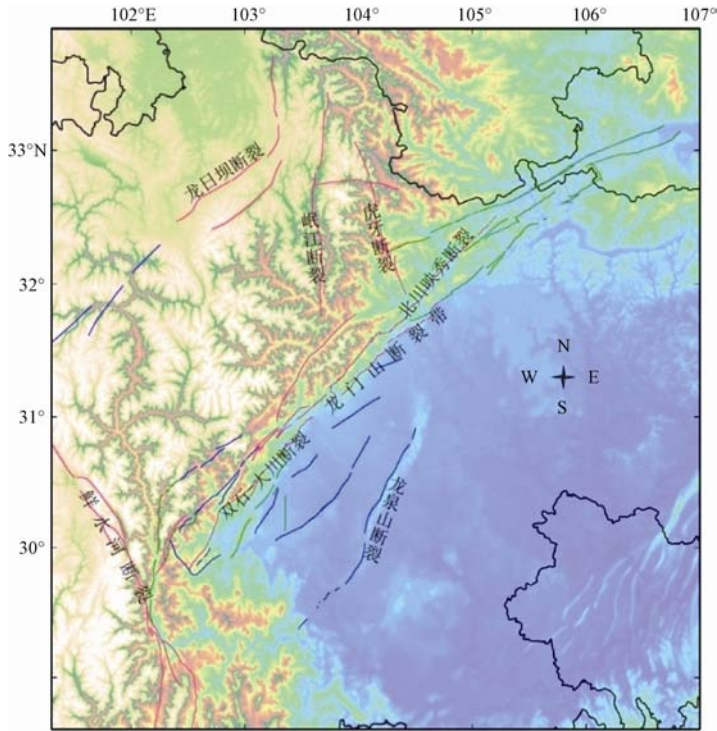


图 1 研究区域（根据邓起东等，2011）

Fig. 1 Research area of this study (after Deng et al., 2011)

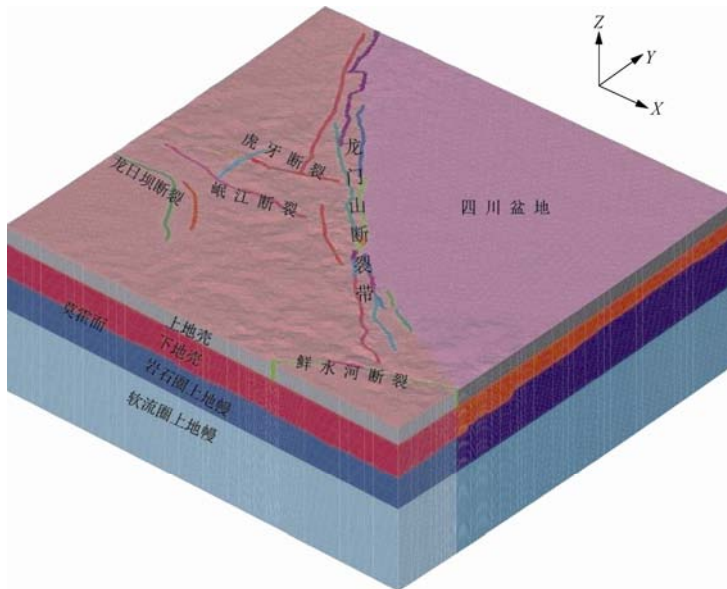


图 2 龙门山地区三维有限元模型

Fig. 2 3-D finite element model of the Longmenshan area

在地表单元, 通过设定密度值引入体力作用。使用六节点三棱柱单元对三维模型进行剖分, 最终得到 69003 个节点, 120210 个单元。采用通用有限元计算程序 ADINA 作为计算平台。

1.2 本构关系和材料参数

在漫长的地质演化历史中, 岩石圈介质表现为流变效应, 可以用粘弹性介质来描述。本文采用 Maxwell 粘弹性本构模型, 其长期表现为流变性质, 瞬时表现为弹性性质, 可以用来模拟岩石圈万年尺度的应力应变演化过程以及地震发生时的瞬时弹性效应, 有本构关系为:

$$\begin{aligned} K(t) &= K \\ G(t) &= Ge^{-\frac{G}{\eta}t} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $K(t)$ 和 $G(t)$ 分别为 Maxwell 模型的体积模量和剪切模量, η 为粘滞系数, K 为弹性体积模量, G 为弹性剪切模量。后 2 个参数可由线弹性本构模型的杨氏模量 E 和 Poisson 比 ν 换算得到 (周光泉等, 1996)。根据研究区深部反演获得的三维 P 波、S 波速度结构 (吴建平, 2006; 王椿镛等, 2008) 可以计算得到杨氏模量 E 和泊松比 ν 。根据前人在该地区的研究成果 (石耀霖等, 2008; 杨强等, 2010; 曹建玲等, 2009) 确定粘滞系数。考虑到断层带介质一般相对周边活动地块介质较软, 将断层的杨氏模量取其两侧介质杨氏模量平均值的 1/3, 取泊松比为比两侧介质的平均值高 0.02 (杨兴悦等, 2013; 李玉江等, 2013a)。地表单元的密度取为 $2.7 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。最后得到的研究区介质分层材料参数, 如表 1 所示。

表 1 研究区介质分层材料参数

Table 1 Material parameters of the layered medium in the research area

分层	深度/km	四川盆地			青藏高原东缘		
		$E/10^{10} \cdot \text{Pa}$	ν	$\eta/10^{22} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$	$E/10^{10} \cdot \text{Pa}$	ν	$\eta/10^{22} \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$
地表	0—0.5	3.75	0.21	0.8	3.75	0.21	0.8
上地壳	0.5—20	7.2	0.246	9.96	7.39	0.25	10.3
下地壳	20—Moho 面	12.5	0.253	0.925	11.9	0.254	2.02
岩石圈	Moho 面—100	17.5	0.265	0.05	17.50	0.265	0.05
软流圈	100—200	17.5	0.265	0.5	17.50	0.265	0.5

1.3 模型加载条件和边界条件

为了进行计算, 需要对模型施加加载条件和边界条件。根据地表 GPS 观测值 (张培震等, 2008) 在模型 4 个侧边界通过插值得到位移加载条件, 如图 3 所示。由于 GPS 值在深部与地表的差异尚无定论, 因此假设加载条件从地表到地下 200km 深度保持一致 (李玉江等, 2013a)。考虑到 GPS 观测值代表地壳水平位移的年变化值, 因此设置加载时间函数为每年增加 1 个载荷单位, 这样就保证了时间间隔为 1 年的相邻两个状态, 加载条件的增加量为地壳水平位移的年变化值, 从而使加载条件在物理意义上是合理的。模型底边界条件为沿垂向 (Z) 固定, 沿水平 (X, Y) 向自由; 上表面为自由边界。

1.4 模型检验

在以上介质参数、加载条件和边界条件下, 对模型加载 40 万年, 并使用 ADINA 自带的位移消除算法解决因施加重力导致的模型塌陷问题, 最后得到稳定的应力状态, 将其作为研究区现今构造背景应力场, 在此基础上模拟地震的发生。为检验模型的可靠性, 将模拟得到

的地壳水平运动速率与 GPS 观测值进行比较，如图 4 所示。对比模拟值与观测值可以看出，

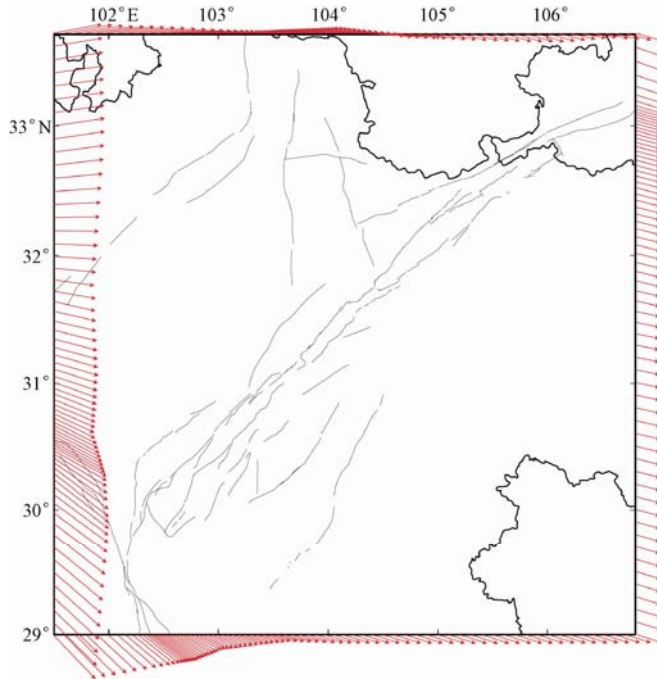


图 3 模型加载条件

Fig. 3 Loading condition of the model

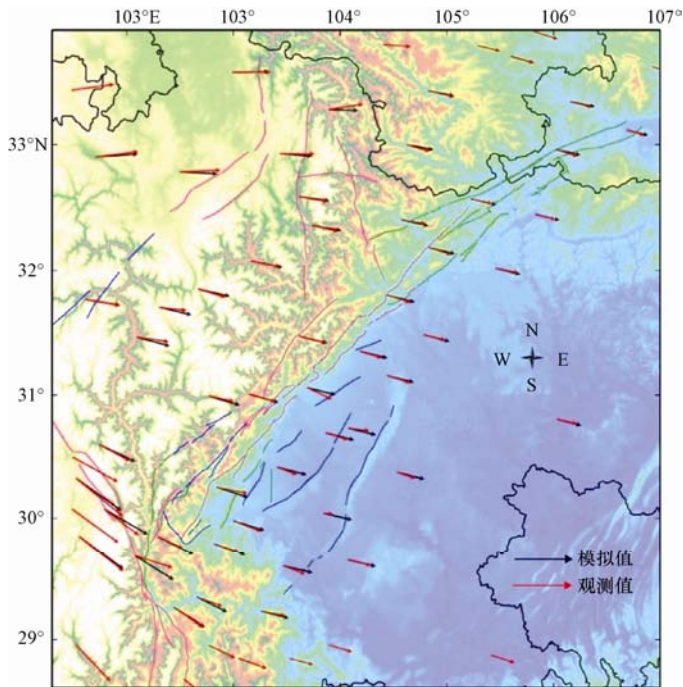


图 4 地壳水平运动速率模拟值与观测值的对比

Fig. 4 Comparison of the simulated and the observed values of the crustal horizontal movement velocity

两者的方向和大小在大部分地区都非常接近, 仅在鲜水河断裂带附近存在一些差异, 这可能与鲜水河断裂带活动性较强有关, 也不排除 GPS 观测值本身存在误差。定量计算得到模拟值与观测值方向夹角的平均值 A 为 3.934° , 长度相对差异的平均值 L 为 0.142 。因此, 我们认为, 模拟结果基本反映了研究区域的现今构造变形状态, 将此状态下的应力场作为研究区现今构造背景应力场, 即汶川和芦山地震发生的背景应力场状态。

2 库仑破裂应力累积速率

2.1 库仑破裂应力计算方法

根据库仑破裂准则, 当岩石趋近破裂时库仑破裂应力 F_{CFS} 为:

$$F_{\text{CFS}} = \tau + \mu(\sigma_n - p) \quad (2)$$

其中, μ 为摩擦系数, τ 为主震产生的应力张量在断层面上的剪切应力大小, 以沿断层滑动方向为正, σ_n 为断层面上的正应力, 以张应力为正, p 为孔隙压力。通常更关心的是库仑破裂应力的变化 (Harris, 1998), 当 μ 不随时间变化时, 由式 (2) 可得库仑破裂应力的变化 ΔF_{CFS} 为:

$$\Delta F_{\text{CFS}} = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n - \Delta p) \quad (3)$$

孔隙压力变化控制着断层面上的有效正应力, 对于各向同性均匀介质, 孔隙压力对摩擦系数的影响可用等效摩擦系数 $\mu' = \mu(1 - B)$ 表示, 其中 B 为 Skempton 系数, 范围为 0—1 (万永革等, 2000; 缪淼等, 2013), 则式 (3) 变为:

$$\Delta F_{\text{CFS}} = \Delta\tau + \mu' \Delta\sigma_n \quad (4)$$

等效摩擦系数 μ' 取值通常为 0—0.75, 平均值约 0.4 (Freed, 2006)。数值实验表明, 取不同 μ' 值计算得到的库仑破裂应力的空间分布相差不大, 但应力的大小有一定的差别 (万永革等, 2000)。本文计算中取 $\mu' = 0.4$ 。一般认为, 库仑破裂应力变化大于 0.01MPa 是触发后继地震的阈值 (Harris, 1998)。

2.2 断裂带库仑破裂应力累积速率

将模拟得到的节点应力张量的 6 个分量投影到所选断裂带的断层面上, 再根据式 (4) 计算断层上库仑应力的年变化, 可得到该断裂带上库仑破裂应力的年累积速率 (陈连旺等, 2001; 李玉江等, 2013a)。对研究区内主要断裂带均采用以上方法进行计算, 最后得到龙门山及周边地区主要断裂带库仑破裂应力年累积速率分布, 如图 5 所示。由图可以看出, 库仑破裂应力年累积速率最大的是鲜水河断裂带, 为 $1.2\text{—}1.6 \times 10^{-3} \text{MPa} \cdot \text{a}^{-1}$, 表明鲜水河断裂带上的应力累积速率很快, 发生较强地震的周期较短, 这与鲜水河断裂带历史强震频发的规律基本一致。对于龙门山断裂带, 中段和北东段累积速率很小, 约为 $0.2\text{—}0.3 \times 10^{-3} \text{MPa} \cdot \text{a}^{-1}$; 南段的累积速率比北东段大, 约为 $0.4\text{—}0.6 \times 10^{-3} \text{MPa} \cdot \text{a}^{-1}$, 因此本文认为龙门山断裂带南段的活动性要强于北东段, 这与史翔等 (2009) 和陈立春等 (2013) 通过历史地震研究得到龙门山断裂带北东段在第四纪活动不明显、第四纪以来无强震记录、南段至少有 3 次 6 级以上强震记录的结论是相符的。

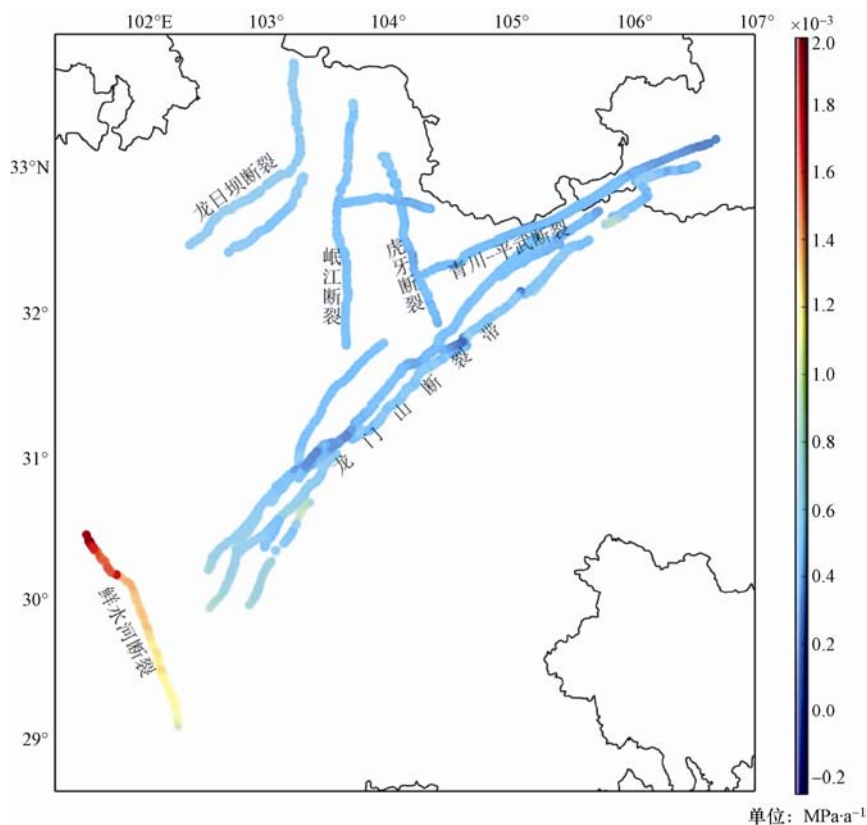


图 5 龙门山及周边地区主要断裂带上的库仑破裂应力年累积速率

Fig. 5 Cumulative Coulomb failure stress of year in the main fault zone in Longmenshan and its surrounding area

3 计算结果

3.1 汶川地震和芦山地震的数值模拟

地震在一定背景应力场条件下发生, 与漫长的地质演化历史相比, 地震的发生是一个瞬态过程, 在力学上可视为一个弹性过程。如果忽略地震中发震断层的动态破裂过程, 而仅仅研究地震前后的静应力状态变化, 可以采用准静态方法模拟地震发生。本文使用 ADINA 的重启动算法引入研究区现今构造背景应力场, 采用降低发震断层介质参数的方法模拟实际地震的发生。根据弹性力学理论 (王敏中等, 2011), 对于弹性材料, 泊松比 ν 与体积模量 K 和剪切模量 G 的关系为:

$$\nu = \frac{K}{2(K + G)} \quad (5)$$

一般认为介质的泊松 ν 比是常量, 因此我们在模拟地震时, 按相同比例同时降低 K 和 G 。为了使模拟地震的断层错动尺度与实际情况一致, 选取发生地震时断层的水平滑动位移作为约束条件。关于地震模拟中发震断层的设置, 对于汶川地震, 以实际地表破裂为发震断层 (徐锡伟等, 2008; 2013a; 邓起东等, 2011), 即沿龙门山中央断裂的北川-映秀断裂 (长约 240km), 沿前山断裂的汉旺-白鹿地表破裂 (长约 72km), 沿小鱼洞的地表破裂 (长约 6km), 共设置

3 条发震断层。而对于芦山地震，由于震后地震地质调查没有发现明显的地表破裂痕迹（徐锡伟等，2013b），且对于发震断层的确定尚未形成共识（许冲等，2014；陈立春等，2013），因此我们选择震中位置所在的双石-大川断裂作为芦山地震的发震断层，根据地震类型、破裂长度与震级的统计关系（Wells 等，1994）计算得到断层破裂长约 46.7km，并且在设置发震断层时，使破裂未到达地表。表 2 给出了模拟 2 次地震所使用的计算参数。

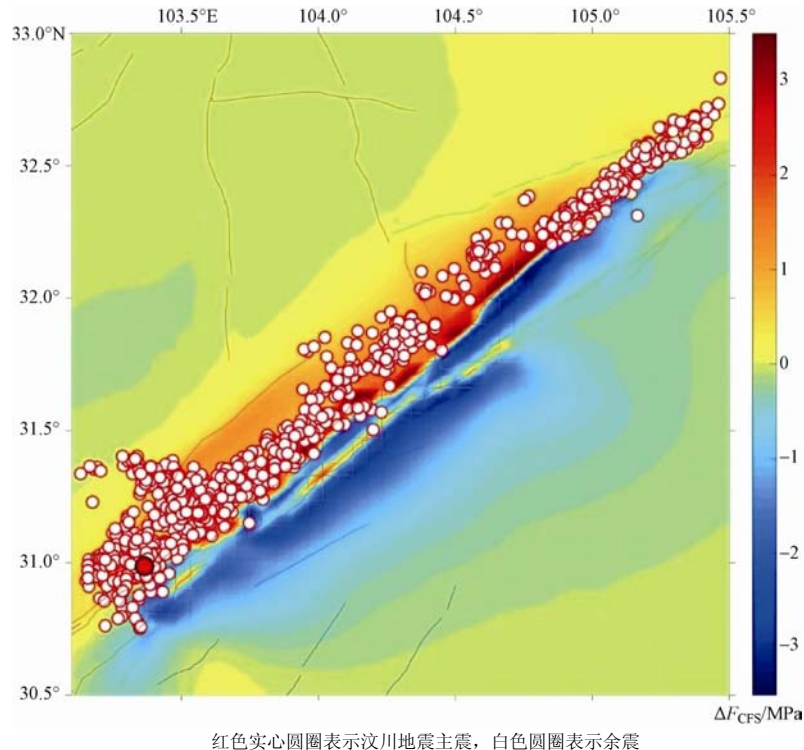
表 2 汶川地震和芦山地震参数

Table 2 Earthquake parameters of the Wenchuan earthquake and Lushan earthquake

事件	经度	纬度	走向	倾角	滑动角	最大水平滑动量/m	破裂长度/km	数据来源
汶川	103.4° E	31.0° N	231°	35°	138°	4.9	>300	中国地震台网中心；Global CMT；徐锡伟等，2008
芦山	102.89° E	30.31° N	212°	44°	92°	1.3	46.7	USGS；曾祥方等，2013；徐锡伟，2013；张勇等，2013

3.2 主震对余震的影响

为研究主震对余震的影响，本文收集了汶川地震主震发生后至 2008 年 7 月 8 日共 2553 次 2.5 级以上余震，以及芦山地震后至 2013 年 4 月 26 日共 445 次 2.5 及以上余震的定位结果。分别计算了汶川和芦山 2 次主震的同震库仑破裂应力变化，并分析其与余震空间分布的关系。图 6 是汶川地震的同震库仑破裂应力变化及余震的空间分布。结果表明，汶川地震有 88.2%

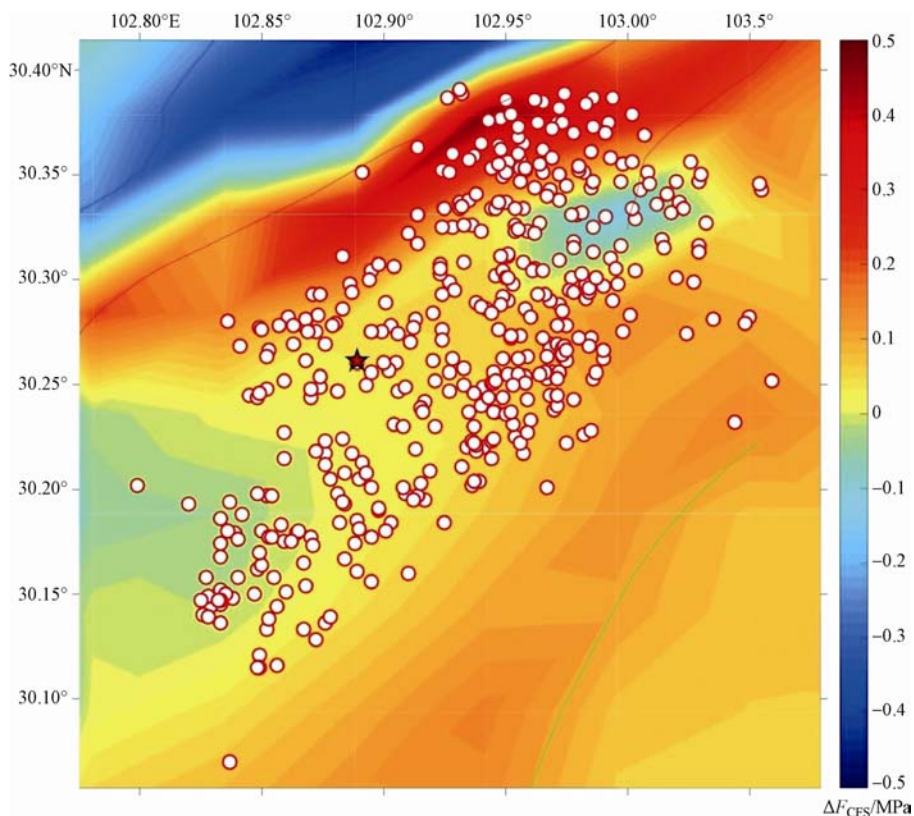


红色实心圆圈表示汶川地震主震，白色圆圈表示余震

图 6 汶川地震的同震库仑破裂应力变化与余震的空间分布

Fig. 6 Coseismic Coulomb stress change of the Wenchuan earthquake and the spatial distribution of aftershock

的余震发生在主震库仑破裂应力大于 0.01MPa 的加载区, 说明主震触发了大部分余震。计算得到汶川主震震中位置的同震库仑破裂应力为 0.442MPa 。根据前文计算的龙门山断裂带中段的库仑破裂应力年积累速率为 $0.2\text{--}0.3\times 10^{-3}\text{MPa}\cdot\text{a}^{-1}$, 如果按照该累积速率, 并忽略其它影响龙门山断裂带库仑破裂应力累积的因素, 则汶川地震的发震周期约为 1473—2210 年, 这与张培震等 (2008) 通过地震地质方法估算的复发周期为 2233—5952 年, 以及 Ran 等 (2013) 通过古地震研究得出的复发周期约为 2865—2960 年从量级上是一致的。图 7 是芦山地震的同震库仑破裂应力变化及余震的空间分布。计算表明, 芦山地震有 80.3% 的余震发生在主震库仑破裂应力的加载区, 其中有 75.42% 的余震位于库仑破裂应力大于 0.01MPa 的区域, 说明芦山地震的大部分余震也由主震触发。相比汶川地震中主震对余震的影响, 芦山地震的余震被主震触发的比例较小, 这可能是由于芦山地震的部分余震发生在与发震断层相交成 Y 字型的反冲断层上, 该断层上的地震活动由主震触发 (房立华等, 2013), 故这部分余震相当于是被主震间接而非直接接触。另外也可能与芦山地震的震级相对汶川地震较低、发震构造特殊以及破裂没有贯穿到地表有关。总体而言, 从库仑破裂应力角度, 汶川地震和芦山地震的大部分余震都是被其主震所触发的。



红色实心五角星表示芦山地震主震, 白色圆圈表示余震

图 7 芦山地震的同震库仑破裂应力变化与余震的空间分布

Fig. 7 Coseismic Coulomb stress change of the Lushan earthquake and the spatial distribution of aftershock (Solid red star represents the main shock of Lushan earthquake, the white circle represents the aftershock)

3.3 汶川地震和芦山地震的关系

芦山地震发生在汶川地震之后不足 5 年的时间内，2 次地震之间存在怎样的关系，学术界还有争议（陈运泰等，2013；刘杰等，2013；徐锡伟等，2013b；陈立春等，2013；Jia 等，2014）。为此，本文将从库仑破裂应力和余震分布角度进行一些探讨。图 8 显示了汶川地震产生的库仑破裂应力变化在芦山地震破裂面上的投影。可以看出，芦山地震位于汶川地震同震库仑破裂应力增加的区域，增加量约为 0.016MPa，这与其他学者采用有限断层模型或位错模型的计算结果一致（Parsons 等，2008；Toda 等，2008；万永革等，2009；缪淼等，2013；Wang 等，2014；Jia 等，2014）。因此，从库仑破裂应力角度，汶川地震对芦山地震有触发作用。如果按照龙门山断裂带南段库仑破裂应力年累积速率为 $0.4\text{—}0.6\times 10^{-3}\text{MPa}\cdot\text{a}^{-1}$ 计算，汶川地震使芦山地震提前发生约 27—40 年，这与前人的研究结果是一致的（缪淼等，2013；Wang 等，2014）。

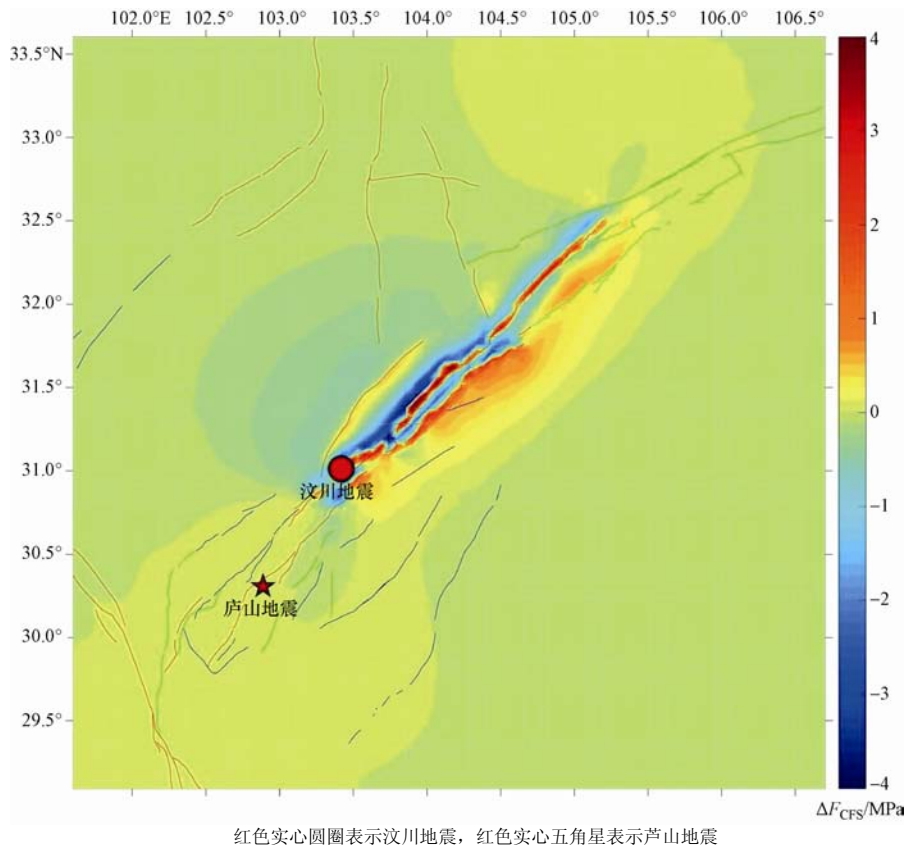
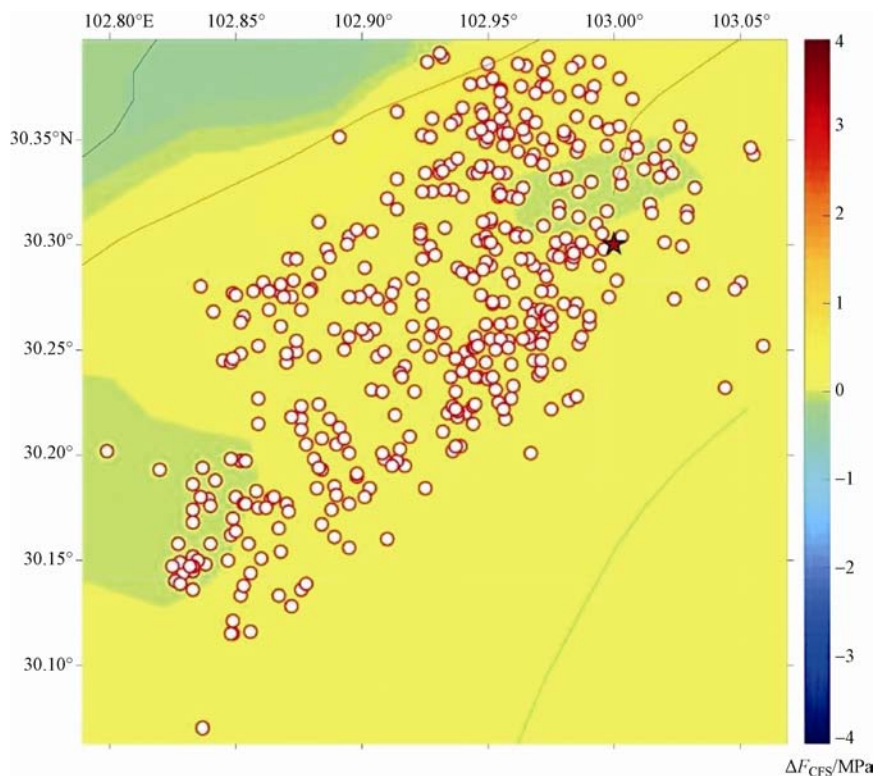


图 8 汶川地震的同震库仑破裂应力在芦山地震破裂面上的投影

Fig. 8 The projection of the coseismic Coulomb stress of the Wenchuan earthquake on the fracture plane of the Lushan earthquake

为了进一步分析汶川地震主震对芦山地震余震的影响，将汶川地震和芦山地震的同震库仑破裂应力叠加再投影到芦山地震破裂面上，其结果与芦山地震余震的空间分布如图 6 所示。计算表明，芦山地震的余震有 85.8% 发生在 2 次地震总的库仑破裂应力的加载区，其中有

82.2%的余震位于库仑破裂应力大于 0.01MPa 的区域,比单独考虑芦山地震同震库仑破裂应力的情况分别增加了 5.5%和 6.78%,说明汶川地震对芦山地震余震也有触发作用,但影响非常有限,芦山地震的余震大部分还是被其自身主震触发的。



红色实心五角星表示芦山地震,白色圆圈表示余震

图9 汶川地震和芦山地震共同产生的同震库仑破裂应力变化与余震的空间分布

Fig. 9 Coseismic Coulomb stress change of the Wenchuan earthquake and Lushan earthquake as well as the spatial distribution of aftershock

3.4 汶川地震和芦山地震对周边断层的影响

本文计算了汶川地震和芦山地震发生后产生的总库仑破裂应力对周边断层的影响,并以此来评估周边断层未来的地震危险性。表3给出了研究区内主要活动断层的参数(邓起东等,1994;李传友等,2004;Toda等,2008;万永革等,2009;单斌等,2009;缪森等,2013)以及最后计算得到的在该断层上的库仑破裂应力变化。图10为汶川地震和芦山地震共同导致的龙门山地区主要活动断层的库仑破裂应力变化。可以看出,汶川和芦山地震后,龙门山断裂带库仑破裂应力变化较大,在北东段,大部分地区应力减小,仅在中央断裂部分应力增加,变化范围为-4.2—3.2MPa。在龙门山断裂带南段,后山断裂和中央断裂应力增加,前山断裂部分应力减小,总的库仑破裂应力变化范围为-2—1.8MPa。龙日坝断裂和岷江断裂整体呈应力减小趋势。虎牙断裂应力增加,最高值为0.08MPa。鲜水河断裂南段带应力增加约0.005—0.15MPa。在这些地区未来发生地震的可能性增大。

表 3 研究区内主要活动断层参数及汶川地震和芦山地震共同引起的库仑破裂应力变化

Table 3 Parameters of the main active faults in research area and the Coulomb stress change caused by the Wenchuan earthquake and Lushan earthquake

断裂名称	走向/ $^{\circ}$	倾角/ $^{\circ}$	滑动角/ $^{\circ}$	库仑破裂应力变化/MPa
龙门山断裂带东北段	225	60	180	-4.2—3.2
龙门山断裂带南段	220	60	90	-2—1.8
鲜水河断裂带南段	142—159.5	90	0—45	0.005—0.15
龙日坝断裂	205—229	60	135	-0.067—0
岷江断裂	180	45—60	45—70	-2.96—0
虎牙断裂	150	75	45	0~0.08

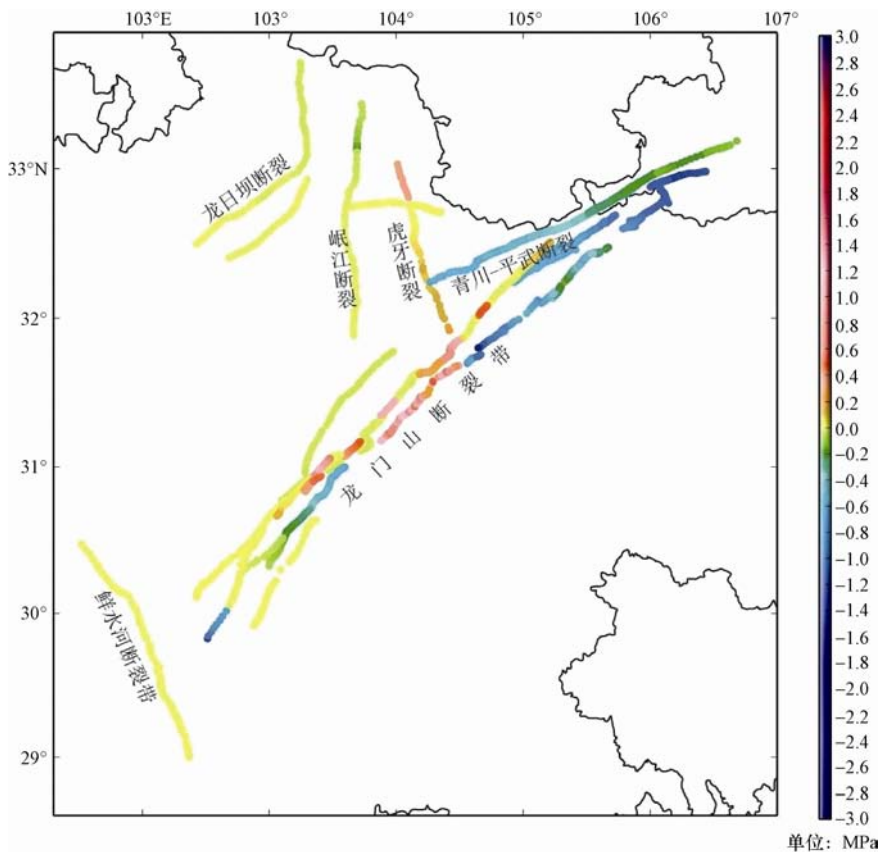


图 10 汶川地震和芦山地震共同引起的龙门山地区主要活动断层的库仑破裂应力变化

Fig.10 Coulomb stress change of the main active faults in Longmenshan and its surrounding area caused by the Wenchuan earthquake and Lushan earthquake

4 结论与讨论

本文基于地质构造、深部反演结果以及 GPS 观测资料等，建立能反映地表起伏和岩石圈

分层结构的龙门山地区三维粘弹性有限元模型。考虑地形附加重力影响重建了研究区现今构造背景应力场。在此基础上,采用数值模拟方法计算了汶川地震和芦山地震的同震库仑破裂应力。通过分析其与余震分布的关系,探讨了汶川和芦山 2 次主震对余震的触发作用以及汶川地震对芦山地震的影响。研究表明,汶川地震和芦山地震的余震大部分是由各自的主震触发的,汶川地震对芦山地震的余震有微弱的触发作用,比例约为 6.78%。从库仑破裂应力角度,汶川地震对芦山地震有触发作用,并使后者提前约 27—40 年发生。汶川和芦山地震的发生使周边的鲜水河断裂带南段、虎牙断裂、龙门山断裂带部分区域库仑破裂应力增加,加大了这些断层发生地震的可能性。

参考文献

- 曹建玲,石耀霖,张怀,王辉,2009. 青藏高原 GPS 位移绕喜马拉雅东构造结顺时针旋转成因的数值模拟. 科学通报, **54** (2): 224—234.
- 陈立春,冉勇康,王虎等,2013. 芦山地震与龙门山断裂带南段活动性. 科学通报, **58** (20): 1925—1932.
- 陈连旺,陆远忠,刘杰等,2001. 1966 年邢台地震引起的华北地区应力场动态演化过程的三维粘弹性模拟. 地震学报, **23** (5): 480—491.
- 陈连旺,张培震,陆远忠等,2008. 川滇地区强震序列库仑破裂应力加卸载效应的数值模拟. 地球物理学报, **51** (5): 1411—1421.
- 陈运泰,杨智娴,张勇,刘超,2013. 从汶川地震到芦山地震. 中国科学: 地球科学, **43** (6): 1064—1072.
- 董培育,程惠红,曾祥方,石耀霖,2013. 四川芦山 M_S 7.0 级地震导致周边断层的应力变化. 科技导报(北京), **31** (12): 19—22.
- 邓起东,陈社发,赵小麟,1994. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学. 地震地质, **16** (4): 389—403.
- 邓起东,陈桂华,朱艾斓,2011. 关于 2008 年汶川 M_S 8.0 地震震源断裂破裂机制几个问题的讨论. 中国科学: 地球科学, **41** (11): 1559—1576.
- 房立华,吴建平,王未来等,2013. 四川芦山 M_S 7.0 级地震及其余震序列重定位. 科学通报, **58** (20): 901—1909.
- 李传友,宋方敏,冉勇康,2004. 龙门山断裂带北段晚第四纪活动性讨论. 地震地质, **26** (2): 248—258.
- 李玉江,陈连旺,陆远忠,詹自敏,2013a. 汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟. 地球科学—中国地质大学学报, **38** (2): 398—410.
- 李玉江,陈连旺,杨树新,2013b. 基于应变能变化的芦山强震同震效应的数值模拟. 震灾防御技术, **8** (4): 361—369.
- 李玉江,陈连旺,刘少峰,杨树新,荆燕,2014. 芦山地震的发生对周围断层影响的数值模拟. 地球学报, **35** (5): 627—634.
- 刘杰,易桂喜,张致伟等,2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 M 7.0 级地震介绍. 地球物理学报, **56** (4): 1404—1407.
- 缪淼,朱守彪,2013. 2013 年芦山 M_S 7.0 地震产生的静态库仑应力变化及其对余震空间分布的影响. 地震学报, **35** (5): 619—631.
- 单斌,熊熊,郑勇,刁法启,2009. 2008 年 5 月 12 日 M_W 7.9 汶川地震导致的周边断层应力变化. 中国科学(D 辑), **39** (5): 537—545.
- 单斌,熊熊,郑勇等,2013. 2013 年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系. 中

- 国科学: 地球科学, **43** (6): 1002—1009.
- 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 马宏生, 张浪平, 2010. 2008 年汶川 M_s 8.0 地震对周边断层地震活动的影响. 地球物理学报, **53** (8): 1784—1795.
- 石耀霖, 曹建玲, 2008. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. 地学前缘, **15** (3): 82—95.
- 史翔, 冉勇康, 陈立春, 王虎, 刘瑞春, 2009. 龙门山中央断裂北川—邓家一带古地震初步研究. 第四纪研究, **29** (3): 494—501.
- 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.
- 万永革, 沈正康, 盛书中, 徐晓枫, 2009. 2008 年汶川大地震对周围断层的影响. 地震学报, **31** (2): 128—139.
- 王椿镛, 楼海, 吕智勇等, 2008. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构——下地壳流的深部环. 中国科学 (D 辑), **38** (1): 22—32.
- 王辉, 刘杰, 石耀霖, 张怀, 张国民, 2008. 鲜水河断裂带强震相互作用的动力学模拟研究. 中国科学 (D 辑), **38** (7): 808—818.
- 王敏中, 王炜, 武际可, 2011. 弹性力学教程. 北京: 北京大学出版社.
- 吴建平, 明跃红, 王椿镛, 2006. 川滇地区速度结构的区域地震波形反演研究. 地球物理学报, **49** (5): 1369—1376.
- 徐晶, 邵志刚, 马宏生, 张浪平, 2013. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系. 地球物理学报, **56** (4): 1146—1158.
- 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青等, 2008. 汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造. 地震地质, **30** (3): 597—629.
- 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华等, 2013a. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论. 地学前缘, **20** (3): 11—20.
- 徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军等, 2013b. 四川芦山 7.0 级强震: 一次典型的盲逆断层型地震. 科学通报, **58** (20): 1887—1893.
- 许冲, 徐锡伟, 2014. 2013 年芦山地震滑坡空间分布样式对盲逆断层构造的反映. 科学通报, **59** (11): 979—986.
- 杨强, 党亚民, 2010. 利用 GPS 速度场估算青藏高原地壳韧性层等效粘滞系数分布的研究. 测绘学报, **39** (5): 497—502.
- 杨兴悦, 陈连旺, 杨立明, 李玉江, 谭佩, 2013. 巴颜喀拉块体强震动力学过程数值模拟. 地震学报, **35** (3): 304—314.
- 张培震, 徐锡伟, 闻学泽等, 2008. 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, **51** (4): 1066—1073.
- 周光泉, 刘孝敏, 1996. 粘弹性理论. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- Freed A. M., 2005. Earthquake triggering by static, dynamic, and postseismic stress transfer. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, **33**: 335—367.
- Harris R. A., 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research*, **103**(B10): 24347—24358.
- Jia K., Zhou S. Y., Zhuang J. C., et al., 2014. Possibility of the independence between the 2013 Lushan earthquake and the 2008 Wenchuan earthquake on Longmen Shan fault, Sichuan, China. *Seismological Research Letters*, **85**(1): 60—67.
- Liu M., Luo G., Wang H., 2014. The 2013 Lushan earthquake in China tests hazard assessments. *Seismological*

- Research Letters, **85**(1): 40—43.
- Luo G., Liu M., 2010. Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 Great Wenchuan earthquake. *Tectonophysics*, **491**: 127—140.
- Parsons T., Ji C., Kirby E., 2008. Stress changes from the 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, **454**(7203): 509—510.
- Ran K. Y., Chen W. S., Xu X. W., et al., 2013. Paleoseismic events and recurrence interval along the Beichuan-Yingxiu fault of Longmenshan fault zone, Yingxiu, Sichuan, China. *Tectonophysics*, **584**: 81—90.
- Toda S., Lin J., Meghraoui M., et al. 2008. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophysical Research Letters*, **35**(17).
- Wang Y. Z., Wang F., Wang M., et al., 2014. Coulomb stress change and evolution induced by the 2008 Wenchuan earthquake and its delayed triggering of the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake. *Seismological Research Letters*, **85**(1): 52—59.
- Wells D. L., Coppersmith K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, **84**(4): 974—1002.

Discussion of Relationship between the Wenchuan Earthquake and Lushan Earthquake from the Viewpoint of Coulomb Failure Stress Change and Spatial Distribution of Aftershocks

Liu Pan, Li Ping'en and Liao Li

(Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China)

Abstract Taking the Longmenshan and its surrounding area as the research area, with consideration of the difference of regional geological structure, the main active fault zone, additional surface gravity, we constructed the 3-D viscoelastic finite element model of the Longmenshan area with irregular topography and the layered lithosphere structure. Using the observed values of crustal horizontal movement as constraint condition, the present tectonic background stress field in the research area is reconstructed. Based on it, the occurrence of Wenchuan earthquake and Lushan earthquake are simulated respectively. Through the analysis the relationship between coseismic Coulomb stress change and the spatial distribution of aftershocks, the trigger action of main shock to aftershock and the influence of Wenchuan earthquake on Lushan earthquake is investigated. The results show that the most aftershocks of Wenchuan earthquake and Lushan earthquake are triggered by their main shock, and only 6.78% aftershock of Lushan earthquake is triggered by Wenchuan earthquake. The coseismic Coulomb stress of the location of Lushan earthquake caused by Wenchuan earthquake is about 0.016MPa. Assuming that the annual cumulative rate of Coulomb stress in the southern segment of the Longmenshan fault zone is $0.4\text{--}0.6\times 10^{-3}\text{MPa}\cdot\text{a}^{-1}$, the occurrence of Wenchuan earthquake causes the occurrence of Lushan earthquake nearly 27—40 years earlier than it should. Our results also show that the Wenchuan earthquake and Lushan earthquake cause the Coulomb stress increase in the southern segment of the Xianshuihe fault zone and Huya fault, which increases the possibility of earthquake in this area in the future.

Key words: Longmenshan fault zone; Coulomb failure stress; Spatial distribution of aftershocks; Wenchuan earthquake; Lushan earthquake; The finite element method