汶川地震对芦山地震孕震环境影响的数值模拟

郭颖星¹, 祝爱玉¹, 张东宁^{1,2*}

1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

2. 中国地震局地震观测与地球物理成像重点实验室, 北京 100081

* 联系人, E-mail: zhangdn@cea-igp.ac.cn

2017-01-24 收稿, 2017-03-10 修回, 2017-03-13 接受, 2017-05-19 网络版发表

中国地震局地震行业科研专项(201408014)、中国地震局基本业务专项(DQJB16B06)和国家自然科学基金(41504079)资助

摘要 利用有限元数值模拟方法, 以汶川地震和芦山地震的野外地质调查、同震位移和汶川地震前形变观测结果为约束, 分析研究了高海拔地形蓄积的重力位能作用下, 中地壳低速层的存在以及中央断裂和前山断裂同时破裂的条件下汶川地震的发生对龙门山南段孕震环境的影响. 模拟计算结果显示, 在一定的模型壳幔介质属性及空间结构下, 龙门山断裂带西侧低速层的存在、青藏高原向四川盆地过渡带的地形特征以及汶川地震时中央断裂和前山断裂同时破裂的条件, 是控制汶川地震对芦山地震孕震环境影响程度的重要因素. 其中, 地形和低速层对汶川地震引发的芦山地震孕震环境库仑破裂应力变化的影响最为显著, 在所选剖面的北东段, 地形特征的影响更为明显, 而汶川地震双破裂面的影响则较小.

关键词 汶川地震, 芦山地震, 孕震环境, 库仑破裂应力, 数值模拟

2008年5月12日在龙门山断裂带上发生了汶川 M_w 7.9地震^[1], 时隔5年, 这一断裂带距汶川地震震中约90 km^[2]处的芦山地区再次发生了 M_w 6.7的地震^[3], 根据芦山地震科学考察^[4,5]及余震序列精确定位结果^[6,7], 余震分布形态为“Y”型反冲断层, 此次芦山地震的发震断裂很可能是大川-双石断裂向东到大邑断裂之间存在的多条隐伏断裂. 从余震活动分布情况来看, 汶川地震和芦山地震的破裂面尚未贯通^[6,7], 但由于在时间上和构造位置上相近, 汶川地震对龙门山南段断裂带孕震环境的影响、其与芦山地震之间的关系以及龙门山断裂带未来可能的地震危险性一直是学术界关注的热点^[2,3].

汶川地震的发生, 不仅引发了崩塌、滑坡、泥石流、地裂缝等多种地质灾害^[8,9], 而且导致了周边断层上静态库仑破裂应力的变化^[10]. 不少研究学者^[10-14]根据地震之间的应力触发作用讨论了汶川、芦山两个

地震之间的应力触发因果关系, 认为汶川断裂破裂带两端库仑破裂应力增加^[10,12,15,16], 而大邑断裂的库仑应力则有所减少^[11], 汶川地震显著地促进了芦山地震的发生^[17]. 最近的野外调查资料^[18-20]显示, 龙门山断裂带及其北西的巴颜喀拉块体内20~25 km深度上存在一个低速层, 对芦山地震的震源位置起到一定的控制作用^[19-21]. 江油-灌县断裂的同时出现^[22], 也使得单一断面破裂等传统地球物理假设对汶川地震来说存在缺陷^[23]. 青藏高原东缘地貌与重力均衡之间的关系, 对该区地球动力学研究也具有十分重要的影响^[24], 但由于以上研究模型选取范围较大, 没有考虑地表起伏、高海拔重力作用及中地壳低速层等因素对计算结果的影响, 因此有必要在全面考虑这些影响因素的基础上对汶川地震造成的库仑应力做进一步更精细的研究.

龙门山地区大量野外地质调查、同震位移和形变

引用格式: 郭颖星, 祝爱玉, 张东宁. 汶川地震对芦山地震孕震环境影响的数值模拟. 科学通报, 2017, 62: 1882-1895

Guo Y X, Zhu A Y, Zhang D N. Numerical simulation study on the impact of the Wenchuan earthquake to the seismic environment of the Lushan earthquake (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 1882-1895, doi: 10.1360/N972016-01280

观测、重力场及地球物理探测工作的进一步开展,为芦山地震周边断层的库仑应力变化方面的深入研究提供了必要的资料基础。根据以上较为完善的基础数据观测成果,本文用有限元数值模拟方法,以汶川地震同震位移的形变观测资料为约束,通过构建龙门山前山、中央、后山断裂带,山前隐伏断裂及其周边巴颜喀拉块体、华南块体的三维黏弹性地质模型,探讨了地形起伏、中地壳低速层存在与否以及汶川地震断裂带不同破裂情况下龙门山南端大川-双石断裂、大邑断裂以及这两条断裂带之间的“Y”型逆冲断裂断层面的库仑应力变化,探讨不同因素控制下汶川地震对芦山地震孕震环境的影响。

1 有限元模型构建及计算方法

1.1 模型构建

本文根据已有地震波速度结构及电磁结构探测结果,结合地质、形变观测资料构建龙门山及其周边区域的三维黏弹性模型,模型范围选为(101.5°E, 29.5°N), (105.5°E, 29.5°N), (105.5°E, 31.8°N)和(101.5°E, 31.8°N) 4个坐标点围成的矩形区域,模型采用直角坐标系, X轴及Y轴的正方向分别为东向和北向, Z轴向上为正, 网格采用六面体8节点网格。根据邓起东等人^[25]关于中国活动断层数据及余震精确定位、震源机制和震源破裂过程的研究成果经适度简化后构建了龙门山前山断裂、中央断裂、后山断裂带的北段(茂汶-汶川断裂)以及山前隐伏断裂等断层,为了突出汶川地震对龙门山南段断裂带的影响,本文没有考虑鲜水河断裂带。断层宽度设为3 km, 断裂带倾角设为45°, 倾向为西, 设置断层深度到达上地壳底部(深度约20 km), 采用相对周围材料较低的杨氏模量和黏滞系数的软弱夹层方式表示。为了研究构造区域内巴颜喀拉块体高海拔地势重力势能能对研究区域构造运动的影响, 根据GTOPO30模型数据, 对研究区域三维模型添加了地表高程数据, 模型深度设为80 km, 使其可以涵盖整个研究区域的地壳深度范围, 并按上地壳、中地壳、下地壳(深度数据选自Crust1.0模型)及模型底部将模型分为4个层面。根据前人研究结果, 在巴颜喀拉块体及龙门山断裂带以下沿上地壳底面设置5 km厚(深度约20~25 km)的低速层^[18,20,26], 此低速层位于模型(图1)西北部并向东延伸到龙门山前山断裂带以西, 并通过改变黏滞

图1 研究区域有限元网格模型
Figure 1 Finite element mesh model of research area

系数和弹性模量来表示该低速层。设置模型表面自由, 底部固定。

(i) 地震发震断层的建立。震源机制解及地表位移破裂面等研究显示, 汶川地震包括两个压性逆冲兼右旋走滑破裂面: 北川-映秀断层破裂和前山断层破裂^[3,27,28], 其中, 北川-映秀断裂为汶川地震主要发震断裂, 主要发育在古生代和中生带地层与晋宁期花岗岩体之间, 总长约300 km, 总体走向为N35°~E45°, 倾向NW^[29], 汶川地震沿北川-映秀断裂展布的地表破裂带长约240 km, 而沿江油-灌县断裂连续展布的地表破裂带长约72 km^[22]。

芦山地震没有引起明显的地表破裂, 其发震构造还存在较大争议。一些研究结果认为芦山地震的发震断裂是龙门山前山断裂的南段, 即大川-双石断裂^[28,30,31]; 也有研究认为发震断裂为龙门山山前的大邑断裂^[32,33]; 而房立华等人^[6,7]根据余震精定位结果推测在芦山地震震源附近大川-双石断裂与山前隐伏断裂之间存在一条呈“Y”型的逆冲隐伏断裂, 并认为芦山地震的主震破裂可能包括了大川-双石断裂与大邑断裂之间呈“Y”型的隐伏断裂。

在模拟研究汶川地震对芦山地震孕震环境影响时, 本文考虑了汶川地震只有北川-映秀断层破裂及北川-映秀和江油-灌县两条断裂同时破裂的情况。根据汶川地震发生后龙门山主要断层的破裂区段, 将模型中龙门山中央断裂带分割为北川-映秀断裂带和盐井-五龙断裂带, 将前山断裂带分割为江油-灌县断裂带和大川-双石断裂带, 根据房立华等人^[6,7]给出的形态分布, 设置“Y”型逆冲断裂西支深度为5~15 km, 东支深度为5~20 km, 并令这两条断裂底部相交, 将山前隐伏断裂也分割为大邑断裂、竹瓦铺-什邡断裂和绵竹断裂。因后山断裂南段耿达-陇东断裂与中央断裂南段盐井-五龙断裂距离较近, 限于模型分辨率,

将其合并为一条.

(ii) 地形作用的影响. 地形引起的附加重力是形成青藏高原现今地壳运动格局不可忽视的动力来源^[34], 龙门山断裂带位于青藏高原与四川盆地之间的过渡区域, 地形起伏剧烈, 重力处于明显的不均衡状态^[35], 在重力作用下, 青藏高原高位势物质向低位势转移, 遇到华南地块阻挡, 形成较为强烈的挤压作用, 并在龙门山两侧产生流变变形, 对龙门山地区地表形变造成一定的影响, 龙门山两侧显著的地形高差也对汶川地震的孕育、发生和发展在能量储集方面起到关键性的作用^[24]. 但由于龙门山地区地形差异显著, 添加地形后会使得网格模型发生严重变形并对计算过程造成影响, 因此在目前青藏高原动力学研究的数值模拟计算中不考虑重力作用的情况比较常见^[36-39]. 基于重力因素对模拟地壳和上地幔构造应力状态的重要性^[40], 本文在模型中考虑了地形作用, 并采用初始位移消除算法^[41]对模型进行恢复, 从而在保证地应力几乎不变的前提下将长时间重力作用所造成的网格变形恢复到模型网格的初始状态^[42].

1.2 材料参数

GPS形变观测资料显示, 川滇地区现今的运动模式支持较硬的脆性上地壳和软弱柔性的中-下地壳动力学模型^[43], 王椿镛等人^[19]也认为羌塘块体和巴颜喀拉块体下地壳S波低速异常、具有复杂的莫霍过渡带以及地壳高泊松比的特征, 预示下地壳物质处于热和软弱状态; 石耀霖和曹建玲^[44]认为, 青藏高

原中-下地壳等效黏滞系数较低, 而四川盆地岩石强度和等效黏滞系数比较高. 本文中黏滞系数的选取参照以上研究成果及前人给出的部分材料参数结果^[45], 并按照巴颜喀拉块体及华南块体地壳的软弱情况进行估算(表1); 模型中弹性模量及流变参数则通过地震波速度结果及电磁探测结果来确定, 根据Laske等人发布的Crust1.0模型数据(<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>), 利用地壳和上地幔P波速度结构、S波速度结构计算(式(1))得到巴颜喀拉块体及华南块体地壳及上地幔顶部各层的泊松比(表1); 结合Crust1.0给出的密度, 采用Stolk等人^[46]分辨率较高的P波速度结构数据计算(式(2))得出杨氏模量(表1).

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}, \quad (1)$$

$$E = \frac{V_s^2 \rho (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2}, \quad (2)$$

式中, E 为杨氏模量, ν 为泊松比, ρ 为密度, V_p 和 V_s 分别为P波及S波速度.

1.3 计算方法及模型检验

在模型计算过程中, 采用赵静等人^[47]汶川地震前的地表GPS观测结果进行插值作为研究区域边界的速度约束, 并将其与各时间步相乘得出研究区域地表边界上的位移约束条件, 由于缺乏岩石圈深部的位移速率资料, 将地表位移结果进行外推, 初步近似为岩石圈深部的位移边界条件. 此GPS观测结果为相对华南地块的位移变化, 因此将模型东南侧华

表1 模型材料参数表

Table 1 Material parameters of model

分区名称	分层	杨氏模量(Pa)	泊松比	黏滞系数(Pa S)
华南地块	上地壳	8.2705×10^{10}	0.2436	8×10^{23}
	中地壳	9.8028×10^{10}	0.2485	4×10^{23}
	下地壳	1.0534×10^{11}	0.2813	1×10^{23}
	上地幔顶部	1.6906×10^{11}	0.2767	5×10^{22}
巴颜喀拉地块	上地壳	8.3716×10^{10}	0.2450	5×10^{23}
	中地壳	9.8523×10^{10}	0.2501	1×10^{23}
	下地壳	1.1779×10^{11}	0.2595	5×10^{22}
	上地幔顶部	1.6906×10^{11}	0.2767	5×10^{22}
低速层		8.0283×10^{10}	0.2137	1×10^{22}
断裂带		1×10^{10}	0.45	1×10^{22}

南地块位移设为0 mm/a。模拟模型初始应力时,为反映岩石圈重力及流变作用的影响,对模型施加重力作用(重力加速度 9.8 m/s^2)并持续足够长时间(本文取40万年),使模型在“静岩压力”下达到稳定。采用初始位移消除算法^[41]对模型进行1年及10000 s的恢复,待模型稳定后添加汶川地震前GPS位移观测结果^[47]作为边界条件计算1万年,得到研究区稳定地壳构造应变场和应力场,并用前人地表形变观测数据对本模型应变计算结果进行检验。

图2为地形重力位能及流变作用下,汶川地震发生前龙门山地区的应变分布情况,在模型水平东西方向,巴颜喀拉块体西侧的应变值较大,向东北方向逐渐减小,向东位移约为2~9 mm/a,与Shen等人^[43]得出的青藏高原东部平均速率为5 mm/a的结果相接近;在水平南北方向,巴颜喀拉块体北部相对于华南块体向北约有1 mm/a的位移变化,南部相对华南块体则为向南运动,最大位移约为8 mm/a,这与赵静等

人^[47]GPS观测结果相一致;在垂直方向,孟宪纲等人^[48]认为,巴颜喀拉块体平均隆升速率达6 mm/a,四川盆地平均下降速率为2 mm/a,本模型中巴颜喀拉块体的垂直应变为0~7 mm/a,华南地块的垂直应变则约为1 mm/a,与孟宪纲等人^[48]的结果比较接近。

2 汶川地震对芦山地震孕震环境影响的数值模拟实验

2.1 汶川地震发生的有限元数值模型

汶川地震发生时,沿龙门山中央断裂的中-北段以及前山断裂的中段产生了大规模的地表破裂带^[29]。在主要破裂带上,北川-映秀断层破裂长度为320 km,最大滑动量达7.3 m^[3],映秀-虹口段最大同震垂直位移为 $6.2 \pm 0.5 \text{ m}$,小鱼洞-清平-茶坪段主破裂面同震垂直位错为5.4 m^[49],北川-南坝-平溪组段北川县柳林村一带,垂直位移为2.5~3.0 m^[29]。地表次级破裂带——江油-灌县断裂在汶川地震发生后,地表破裂达到73 km,最大垂直位移达到3.5 m^[22,50],其中,白鹿寺沟一带垂直位移介于1.8~2.3 m,涧安村附近为0.5~0.6 m,汉旺清水河东岸垂直位移为 $1.3 \pm 0.2 \text{ m}$,泉新村附近为0.9~1.2 m^[29]。

本文通过降低汶川地震发震断层的杨氏模量模拟汶川地震的发震情况,并通过计算库仑应力变化来模拟汶川地震对龙门山南段各断裂带孕震环境的影响。模拟过程中,参照前人^[10,51,52]的研究结果,令内摩擦系数取值为0.4,并将北川-映秀断裂带的杨氏模量由 $1 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 降低为 $5.5 \times 10^9 \text{ Pa}$,江油-灌县断裂带的杨氏模量由 $1 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 降低为 $8 \times 10^9 \text{ Pa}$,模拟地震发震时间为90 s,并使模拟的北川-映秀断层破裂面位错达到约7.3 m,江油-灌县断裂带上最大位移变化达到3.5 m,地表垂直位移主要集中在1.5~2 m之间,确保其与野外实地调查结果接近。由于主要考虑汶川地震对龙门山断裂带南部的影响,因此只选取了破裂主要集中区域,即汶川震中东北侧100 km到震中西南侧30 km的范围。地震破裂剖面模拟结果如图3和4所示,将北川-映秀破裂模拟结果与前人反演计算结果^[3]进行对比(图3),以上两种结果最大位错均位于汶川地震震源处附近,对于汶川地震释放的标量地震矩,张勇等人^[1]得出的结果为 $9.4 \times 10^{20} \text{ N m}$,哈佛大学为 $9.4 \times 10^{20} \text{ N m}$,美国地质调查局为 $7.5 \times 10^{20} \text{ N m}$ ^[1],本文通过地震剖面积分计算得出的汶川

图2 添加地形及GPS位移约束后模型应变分布情况。(a) 水平面东西方向;(b) 水平面南北方向;(c) 垂直方向

Figure 2 The strain distribution with the constraint of terrain and GPS result. (a) Horizontal east-west direction; (b) horizontal north-south direction; (c) vertical direction

图3 北川-映秀断裂面模拟破裂结果与前人的对比情况(黑色五角星代表汶川地震震源附近). (a) 本文模拟结果; (b) 陈运泰等人^[3]的反演结果
Figure 3 Comparison of simulated rupture results with previous studies for the Beichuan-Yingxiu fault plane (black star was the source of Wenchuan earthquake). (a) The results of this study; (b) the result from Chen et al.^[3]

图4 江油-灌县断裂带模拟破裂结果(黑色五角星代表汶川地震震源附近)
Figure 4 Simulated rupture results for the Jiangyou-Guanxian fault plane (black star was the source of Wenchuan earthquake)

地震破裂主要集中在区标量地震矩为 7.3×10^{20} N m, 与前人的结果较为接近。

2.2 低速层对龙门山南部孕震环境的影响

根据前人研究结果^[20], 龙门山断裂带及其北西的巴颜喀拉块体内20~25 km深度上存在一个低速层^[29], 这一低速层与该区上地壳解耦, 并构成了一个深部壳、幔高速物质向东与向东南运移的上滑移面^[21]. 本文在模型前山断裂以西的中地壳顶部(约20~25 km深处)添加5 km厚的低速层, 令其与后山断裂及中央断裂的底部相连接, 并采用低的黏滞系数和低的弹性模量来表示该低速层。

在地形存在及北川-映秀和江油-灌县双破裂面同时破裂时, 龙门山南段4条断裂带(图5(d))断层面

上库仑应力变化的计算结果显示(图5(a)和(b)), 考虑或者不考虑低速层时, 汶川地震造成的龙门山南段断裂带断面上的库仑应力变化趋势均比较接近. 在地表附近, 大川-双石断裂断层面上库仑应力约为0 MPa, 并向南西方向逐渐减小, 在芦山地震震源附近, 库仑应力约为-0.02 MPa(图5(a)-①和(b)-①), 相对于不考虑低速层的情况, 考虑低速层影响后, 断层面南西侧有所降低, 北东侧底部则有所增加, 而在芦山地震震源附近, 库仑应力计算值的改变量并不明显(图5(c)-①); 汶川地震造成“Y”型断裂西支断层面上库仑应力显著减小, 在芦山地震震源附近, 断层面上库仑应力为-0.02~-0.03 MPa之间(图5(a)-②和(b)-②), 考虑低速层后, 断层面整体库仑应力有一定的增加, 且断层面底部库仑应力增量大于断层面顶部

图5 汶川地震发生时低速层对龙门山南段断裂带库仑应力影响。Depth, 断层面的深度范围; distance, 断层面不同深度处距离断层面顶端的距离; 五角星代表芦山地震震源处。(a) 不考虑低速层时的库仑应力;(b) 考虑低速层时的库仑应力;(c) 考虑低速层时相对于不考虑低速层时的库仑应力的变化量;(d) 四条剖面对应的龙门山断裂带南段断层示意图(改自祝爱玉等人^[42])

Figure 5 The effect of the low velocity layer for the Coulomb stress of the southern Longmenshan Mountains caused by Wenchuan earthquake. (a) The Coulomb stress result without considering the low-velocity layer; (b) the Coulomb stress result with considering the low-velocity layer; (c) the Coulomb stress result of (b) minus (a). Depth, the depth of the fault; distance, the distance along the fault plane from the top to the depths of the fault; black star was the source of Wenchuan earthquake

(图5(c)-②); 对于“Y”型断裂东支, 汶川地震发生后, 断层面上库仑应力为 $-0.01 \sim 0.03$ MPa(图5(a)-③和(b)-③), 添加低速层后, “Y”型断裂东支断层面上库仑应力整体呈增加趋势, 芦山地震震源附近库仑应力的增加量约为 0.002 MPa(图5(c)-③); 大邑断裂在汶川地震发生后, 断层面上库仑应力显著增加, 且从断层面南西到北东逐渐增大, 不考虑低速层时, 芦山地震

震源附近库仑应力约为 0.03 MPa(图5(a)-④), 添加低速层后, 库仑应力增量约为 0.004 MPa(图5(c)-④). 以上计算结果表明, 在地形及双破裂面存在的情况下, 汶川地震的发生对大川-双石断裂及“Y”型断裂西支地震危险性起到抑制作用, 却增加了“Y”型断裂东支及大邑断裂发生地震的可能性, 四条断层中, 芦山地震震源附近库仑应力最大处位于大邑断裂断层面上。

相较于不考虑低速层的情况,考虑低速层后,四条断裂断层面上库仑应力均有所增加,增量较大的断层为“Y”型断裂东支和大邑断裂,说明低速层的存在使汶川地震对芦山地震的影响作用增强。

2.3 双破裂面对龙门山南部孕震环境的影响

为反映汶川地震不同破裂情况对龙门山断裂带

南段孕震环境的影响,我们在地形及低速层存在的情况下构建了只有北川-映秀断裂带破裂和北川-映秀及江油-灌县断裂带同时破裂的两个模型,得出的龙门山断裂带南段四条断层面上库仑应力计算结果如图6所示。两种破裂情况下,汶川地震造成的龙门山南部断裂断层面上库仑应力分布趋势接近:汶川地震发生后,大川-双石断裂和“Y”型断裂西支断层

图6 汶川地震发生时双破裂面对龙门山南段断裂带库仑应力影响。Depth, 断层面的深度范围; distance, 断层面不同深度处距离断层面顶端的距离; 五角星代表芦山地震震源处。(a) 只有北川-映秀断层破裂时的库仑应力;(b) 北川-映秀和江油-灌县断层同时破裂时的库仑应力;(c) 双破裂面存在时相对于只有北川-映秀断裂破裂时的库仑应力的变化量;(d) 四条剖面对应的龙门山断裂带南段断层示意图(改自祝爱玉等人^[42])

Figure 6 The effect of the double-rupture surface for the Coulomb stress of the southern Longmenshan Mountains caused by Wenchuan earthquake. (a) The Coulomb stress result of the rupture of the Beichuan-Yingxiu faults; (b) the Coulomb stress result of the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults; (c) the Coulomb stress result of (b) minus (a). Depth, the depth of the fault; distance, the distance along the fault plane from the top to the depths of the fault; black star was the source of Wenchuan earthquake

面上库仑应力减小, 而“Y”型断裂东支及大邑断裂断层面上库仑应力则有一定量的增大, 在芦山地震震源附近, 以上4条断裂带断层面上库仑应力分别约为 -0.02 , -0.025 , 0.007 及 0.034 MPa(图6(a)和(b)). 相对于只有北川-映秀断裂带破裂, 当北川-映秀断裂和江油-灌县断裂同时破裂时, “Y”型断裂西支断层面上库仑应力有所减小, 而大川-双石断裂、“Y”型断裂东支及大邑断裂断层面上库仑应力增大, 在芦山地震震源附近, 三条断裂断层面上增量均小于 0.001 MPa(图6(c)). 以上结果说明, 当地形及低速层存在时, 相比于只有北川-映秀断裂带破裂, 北川-映秀和江油-灌县断裂同时破裂一定程度上促进了大川-双石断裂、

“Y”型断裂东支、隐伏断裂发生地震的可能性, 却降低“Y”型断裂西支地震发生的可能性. 与低速层对龙门山断裂带南段断层面上库仑应力的影响(图5(c))相比, 双破裂面造成的库仑应力改变量较小(图6(c)), 表明双破裂面对龙门山南段孕震环境的影响较低速层低.

2.4 不同因素对龙门山南段孕震环境影响的比较

为探讨不同因素对龙门山南段孕震环境的影响, 我们在大川-双石断裂、“Y”型断裂西支、“Y”型断裂东支及隐伏断裂剖面上选取芦山地震震源深度处沿剖面走向的不同点, 并对其进行库仑应力计算(图7),

图7 不同断层沿断层走向上库仑应力计算结果(选取芦山地震震源深度). (a) 大川-双石断裂; (b) “Y”型断层西支; (c) “Y”型断层东支; (d) 大邑断裂. (1) 考虑地形影响、不考虑低速层且只有北川-映秀断裂破裂; (2) 考虑地形影响、不考虑低速层且北川-映秀断裂及江油-灌县断裂同时破裂; (3) 考虑地形影响、考虑低速层且只有北川-映秀断裂破裂; (4) 考虑地形影响、考虑低速层且北川-映秀断裂及江油-灌县断裂同时破裂; (5) 不考虑地形影响、不考虑低速层且只有北川-映秀断裂破裂; (6) 不考虑地形影响、不考虑低速层且北川-映秀断裂及江油-灌县断裂同时破裂; (7) 不考虑地形影响、考虑低速层且只有北川-映秀断裂破裂; (8) 不考虑地形影响、考虑低速层且北川-映秀断裂及江油-灌县断裂同时破裂

Figure 7 Coulomb stress on the fault planes along the strike of faults at the depth of source of Lushan earthquake. (a) Dachuan-Shuangshi fault; (b) the west branch of the “Y”-shaped fault; (c) the east branch of the “Y”-shaped fault; (d) Dayi fault. (1) Considering with the terrain, without the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu fault; (2) considering with the terrain, without the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults; (3) considering with the terrain, the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu fault; (4) considering with the terrain, the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults; (5) considering without the terrain and the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu fault; (6) considering without the terrain and the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults; (7) considering without the terrain, but with the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu and fault; (8) considering without the terrain, but with the low velocity layer, and with the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults

其中,芦山地震震源处位置设为0 km,南西方向为负,北东方向为正.对比结果显示,考虑地形影响下,大川-双石断层从南西部到中部库仑应力计算结果从-0.01 MPa缓慢降低到-0.02 MPa,在剖面北东部库仑应力则显著减小,在距离芦山地震震源约20 km处约降低到-0.045 MPa,是否考虑低速层及双破裂同时存在与否,测线上库仑应力均十分接近;当去掉地形影响时,测线南西方向库仑应力有所增加,而北东方向库仑应力则有所减小,地形特征造成的库仑应力改变量大于低速层及双破裂面的影响.考虑地形影响时,“Y”型断裂西支不同因素约束下测线上的库仑应力差别较小,在剖面南西段约为-0.02 MPa,北东段逐渐降低到约-0.03 MPa;不考虑地形影响时,库仑应力在不同因素影响下均有明显降低,在测线北东部距离芦山地震震源约10 km处库仑应力的减小量超过0.025 MPa,地形特征造成的减小量远大于其他因素的影响.考虑地形影响时,“Y”型断裂东支上不同因素条件下计算得出的各测点库仑应力类似,且沿剖面变化较为平稳,计算结果均位于0~0.01 MPa之间,不考虑地形影响时,测线北东部库仑应力有较明显增加,而南西部及中部库仑应力则并无明显变化.考虑地形特征与否,大邑断裂沿断层面上从南西向北东库仑应力均逐渐增加,且离汶川地震震源越近,不同因素的影响差异越明显,当不考虑地形影响时,大邑断裂测线上库仑应力均明显增大,在测线北东部距离芦山地震震源约20 km处库仑应力的增量超过0.01 MPa.综上所述,地形特征及低速层对各剖面上库仑应力计算结果影响较明显,对于各断裂带北东侧,地形特征对各断裂面北东侧的影响大于低速层,当不考虑地形影响时,“Y”型断层西支以及大邑断裂断层面上库仑应力变化计算结果准确性会明显降低,因此,我们认为大川-双石断裂、“Y”型断裂西支及大邑断裂断层面上地形特征的影响较为明显,其次为低速层,双破裂面的影响则相对较弱.

3 对模型结果的讨论

(1) 低速层及汶川地震不同破裂情况对龙门山南段孕震环境的影响. 在地形及双破裂面存在的情况下,低速层的存在使龙门山南段四条断裂带断层面上库仑应力均有所增加,其中,增加较明显的为“Y”型断裂东支及隐伏断裂,增加量分别达到0.002和0.004 MPa;在考虑地形和低速层以及北川-映秀断

裂带破裂的情况下,增加江油-灌县断裂带的破裂会造成“Y”型断裂西支断层面上库仑应力减小,却使大川-双石断裂、“Y”型断裂东支及隐伏断裂断层面上库仑应力增大,在芦山地震震源附近,这3条断裂带断层面上增量均小于0.001 MPa.说明汶川地震发生后,低速层的存在及江油-灌县断裂带的破裂会增大龙门山南部多数断裂带的危险性,促进芦山地震的发生.

(2) 不同影响因素对模型计算结果影响作用的比较. 龙门山南段不同断层面上库仑应力计算结果(图7)显示,在考虑地形影响时,低速层存在与否对龙门山南段“Y”型断层东支及大邑断裂上库仑应力变化的改变量约为0.002和0.004 MPa,而双破裂面对各断裂带断层面上库仑应力变化的改变量均小于0.001 MPa;在不考虑地形影响时,不同因素作用下,“Y”型断层西支在测线北东部距离芦山地震震源约10 km处库仑应力变化的减小量超过0.025 MPa,大邑断裂在测线北东部距离芦山地震震源约20 km处库仑应力的增量超过0.01 MPa,据上述结果推测,汶川地震发生时,高海拔地形蓄积的重力位能可能为龙门山南段断裂带库仑应力变化的主要影响因素,低速层的存在对龙门山南段孕震环境也起到较大的促进作用,双破裂面的影响则相对较小.

(3) 山前隐伏断裂存在与否对龙门山南段孕震环境的影响. 由于龙门山山前隐伏断裂对龙门山南段孕震环境有重要的影响,我们分别构建了山前隐伏断裂存在和不存在时的两个模型,计算了龙门山南段断裂带上库仑应力的变化情况,计算结果显示,与考虑隐伏断裂(图8(a))时相比,当不考虑山前隐伏断裂(图8(b))时,龙门山南段大川-双石断裂、“Y”型断层西支及东支断层面上库仑应力均有所增加,在芦山地震震源附近,大川-双石断裂断层面上库仑应力接近0 MPa,而“Y”型断层西支断层面上库仑应力大于0 MPa,“Y”型断层东支断层面上库仑应力约为0.03 MPa,说明在不考虑山前隐伏断裂的情况下,汶川地震的发生会增大“Y”型断层西支及东支断裂带的地震危险性,“Y”型断层东支相对于其他断裂带更容易发生地震.

(4) 芦山地震发震断层不在已知断层上的讨论. 本文计算结果显示,汶川地震造成“Y”型断裂东支及大邑断裂芦山地震震源附近的库仑应力变化分别为0.007及0.034 MPa,但根据房立华等人^[6]主震和余震定位结果,芦山地震主要发震断裂可能为“Y”型

图 8 山前隐伏断裂存在(a)或者不存在(b)时龙门山南段断裂带上库仑应力的变化. ① 大川-双石断裂; ② “Y”型断层西支; ③ “Y”型断层东支; 五角星代表芦山地震震源处

Figure 8 The Coulomb stress on the southern Longmenshan Mountains faults with (a) or without (b) the Dayi buried fault. ① Dachuan-Shuangshi fault; ② the west branch of the “Y”-shaped fault; ③ the east branch of the “Y”-shaped fault; black star was the source of Wenchuan earthquake

断裂东支^[4]. 库仑应力计算结果与发震断层不一致, 可能与这一地区历史地震的发生有关, 对于龙门山南段地区, 历史上虽然没有7级以上的地震记录, 但4级左右的中强震活动却较为频繁, 且主要发生在彭灌断裂及大邑断裂上, 例如, 发生在大邑断裂数据较为完整的地震有1970年大邑6.2级地震和1990年大邑4.6级地震^[32], 这些地震的发生使大邑断裂上能量不断释放, 因此即使隐伏断裂上汶川地震造成的库仑应力比“Y”型断裂东支上的高, 但由于长期的应力释放, “Y”型断裂东支上地震活动可能更容易发生. 另外, 库仑应力计算结果与发震断层不一致也有可能和模型分辨率有关, 由于龙门山南段断层分布较为密集, “Y”型断裂东支与大邑断裂距离只有几千米, 在模型较大、分辨率较低的情况下可能会造成一定的显示误差.

(5) 汶川地震的发生对芦山地震孕震环境的影响. 也有研究认为地震的发生是由震源体积效应造成的, 地壳中积累的应变能密度可能是地震释放能量的来源^[53]. 在假定地震活动的能量来源主要为形状变化的应变能时, 通过式(3)计算了汶川地震前后芦山地震震源附近某区域(随机选取山前隐伏断裂与前山断裂之间的部分节点)的应变能密度. 由于精确计算应变能密度年变化率存在困难, 本文用汶川地震前1000年时间内的应变能密度年平均变化率来代替, 计算结果显示, 芦山地震震源附近应变能密度年变化率平均约为 $8.11 \times 10^{-8} \text{ J/cm}^3$, 而汶川地震的发生使芦山地震震源附近应变能密度平均积累了约

$7.98 \times 10^{-6} \text{ J/cm}^3$, 使芦山地震发震时间提前了约98年, 汶川地震显著促进了芦山地震的孕育和破裂.

$$\nu_d = \frac{1+\mu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2], \quad (3)$$

式中, ν_d 为应变(形变)能密度, μ 为泊松比, E 为弹性模量, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 为主应力.

4 结论

本文探讨了龙门山地区地形引起的高海拔重力作用、中地壳低速层及中央断裂及前山断裂双破裂面等因素影响下, 汶川地震的发生对龙门山南段孕震环境的影响, 计算结果如下.

(1) 汶川地震的发生使龙门山南段“Y”型断裂东支及大邑断裂断层面上库仑应力明显增大, 同时也使芦山地震震源附近的应变能密度显著增加, 促进了芦山地震的孕育和破裂.

(2) 各种模拟情况均显示了青藏高原向四川盆地过渡带地形特征显著影响了汶川地震造成的龙门山南部库仑应力的变化. 考虑地形与否, 龙门山南段4条断裂断层面上计算得出的库仑应力有明显变化, 不考虑地形影响时, 大川-双石断裂北东侧、“Y”型反冲断裂西支断层面上库仑应力明显减小, 而“Y”型反冲断裂东支北东侧及大邑断裂断层面上库仑应力则明显增大.

(3) 低速层对汶川地震造成的龙门山南段库仑应力变化有一定的影响. 相对于不考虑低速层的模型, 考虑低速层后, 龙门山南段不同断裂断层面上库

仑应力均有增加,且“Y”型反冲断裂东支和大邑断裂断层面上增加较明显。

(4) 考虑地形的模型计算结果显示,相对于汶川地震只有中央断裂破裂情况,中央断裂和前山断裂都破裂时,“Y”型反冲断裂西支断层面上库仑应力有少量减小,而大川-双石断裂、“Y”型反冲断裂东支和

大邑断裂断层面上库仑应力则有少量增加,但双破裂面对汶川地震引发的芦山地震孕震环境改变量小于低速层影响造成的结果。

在一定的模型壳幔介质属性及空间结构下,以上3种因素中,地形对龙门山南段断裂带孕震环境影响最为明显,其次为低速层,双破裂面的影响相对较弱。

致谢 在本文撰写过程中得到中国地震局第二监测中心王庆良研究员的指导,中国地震局地球物理研究所张旭博士提供了大量建议及帮助,审稿专家对本文进一步修改完善提出了宝贵的意见和建议,特此一并致以衷心的感谢。

参考文献

- Zhang Y, Feng W P, Xu L S, et al. Spatio-temporal rupture process of the 2008 great Wenchuan earthquake. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2009, 52: 145–154 [张勇, 冯万鹏, 许力生, 等. 2008年汶川大地震的时空破裂过程. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 1186–1194]
- Li Y Q, Jia D, Wang M M, et al. Structural geometry of the source region for the 2013 M_w 6.6 Lushan earthquake: Implication for earthquake hazard assessment along the Longmen Shan. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 390: 275–286
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, et al. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake (in Chinese). *Sci Sin Terr*, 2013, 43: 1064–1072 [陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43: 1064–1072]
- The Lushan Earthquake Scientific Research Editorial Board. The Lushan Earthquake Scientific Research (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2015 [《芦山地震科学考察》编委会. 芦山地震科学考察. 北京: 地震出版社, 2015]
- Xu X W, Wen X Z, Han Z J, et al. Lushan M_s 7.0 earthquake: A blind reserve-fault event. *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 3437–3443 [徐锡伟, 闻学泽, 韩竹军, 等. 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*, 2013, 58: 1887–1893]
- Fang L H, Wu J P, Wang W L, et al. Relocation of the mainshock and aftershock sequences of M_s 7.0 Sichuan Lushan earthquake (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1901–1909 [房立华, 吴建平, 王未来, 等. 四川芦山 M_s 7.0 级地震及其余震序列重定位. *科学通报*, 2013, 58: 1901–1909]
- Fang L H, Wu J P, Wang W W, et al. Aftershock observation and analysis of the 2013 M_s 7.0 Lushan earthquake. *Seismol Res Lett*, 2015, 86: 1135–1142
- Li Y J, Ye W L. An analysis of the disaster characteristics of the “5.12 Wenchuan earthquake” in Wudu region (in Chinese). *J Gansu Sci*, 2009, 21: 29–32 [李永进, 叶伟林. 5.12 汶川地震在武都区造成灾害的特点分析. *甘肃科学学报*, 2009, 21: 29–32]
- Wang G L, Zhang J H, Liu H S. Investigation and preliminary analysis of geologic disasters in Beichuan county induced by Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geol Hazard Control*, 2009, 20: 47–51 [王根龙, 张军慧, 刘红帅. 汶川地震北川县城地质灾害调查与初步分析. *中国地质灾害与防治学报*, 2009, 20: 47–51]
- Wan Y G, Shen Z K, Sheng S Z, et al. The influence of 2008 Wenchuan earthquake on surrounding faults (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2009, 31: 128–139 [万永革, 沈正康, 盛书中, 等. 2008年汶川大地震对周围断层的影响. *地震学报*, 2009, 31: 128–139]
- Parsons T, Ji C, Kirby E. Stress changes from 2008 Wenchuan earthquake and increased hazard in the Sichuan basin. *Nature*, 2008, 454: 509–510
- Toda S, Lin J, Meghraoui M, et al. 12 May 2008 $M=7.9$ Wenchuan, China, earthquake calculated to increase failure stress and seismicity rate on three major fault systems. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L17305
- Zhang G H, Shan X J, Li W D. The Coulomb failure stress change associated with the M_s 8.0 Wenchuan earthquake and the risk prediction of its surrounding faults (in Chinese). *Seismol Geol*, 2008, 30: 935–944 [张国宏, 单新建, 李卫东. 汶川 M_s 8.0 地震库仑破裂应力变化及断层危险性初步研究. *地震地质*, 2008, 30: 935–944]
- Shi Y L, Cao J L. Some aspects in static stress change calculation—Case study on Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2010, 53: 102–110 [石耀霖, 曹建玲. 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*, 2010, 53: 102–110]
- Shi Y L. Some knowledge to the Lushan earthquake (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2013, 31: 2 [石耀霖. 我对芦山地震的一些认识. *科技导报*, 2013, 31: 2]
- Liu M, Luo G, Wang H. The 2013 Lushan earthquake in China tests hazard assessments. *Seismol Res Lett*, 2014, 85: 40–43

- 17 Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake. *Sci China Earth Sci*, 2013, 56: 1169–1176 [单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 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*, 2013, 43: 1002–1009]
- 18 Wang C Y, Han W B, Wu J P. Crustal structure beneath the Songpan-Garze orogenic belt (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2003, 25: 229–242 [王椿镛, 韩渭宾, 吴建平. 松潘-甘孜造山带地壳速度结构. *地震学报*, 2003, 25: 229–242]
- 19 Wang C Y, Lou H, Lü Z Y, et al. S-wave crustal and upper mantle's velocity structure in the eastern Tibetan Plateau—Deep environment of lower crustal flow. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2008, 51: 263–274 [王椿镛, 楼海, 吕智勇, 等. 青藏高原东部地壳上地幔 S 波速度结构——下地壳流的深部环境. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2008, 38: 22–32]
- 20 Zhu J S. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere (in Chinese). *J Chengdu Univ Tech*, 2008, 35: 348–356 [朱介寿. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. *成都理工大学学报*, 2008, 35: 348–356]
- 21 Teng J W, Pi J L, Yang H, et al. Wenchuan-Yingxiu Ms8.0 earthquake seismogenic faults and deep dynamic response (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 392–403 [滕吉文, 皮娇龙, 杨辉, 等. 汶川-映秀 Ms8.0 地震的发震断裂带和形成的深层动力学响应. *地球物理学报*, 2014, 57: 392–403]
- 22 Xu X W, Wen X Z, Ye J Q, et al. The Ms8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure (in Chinese). *Seismol Geol*, 2008, 30: 597–629 [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: 597–629]
- 23 Liu J, Zhang Z H, Wen L, et al. The Ms8.0 Wenchuan Earthquake co-seismic rupture and its tectonic implications—An out-of-sequence thrusting event with slip partitioned on multiple faults (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2008, 82: 1707–1722 [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: 1707–1722]
- 24 Yang H, Teng J W, Wang Q S, et al. Numerical simulation on the special gravity fields and dynamic response in Longmenshan orogenic belt and adjacent area (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 106–116 [杨辉, 滕吉文, 王谦身, 等. 龙门山造山带及邻区重力场特征与动力学响应数值模拟. *地球物理学报*, 2013, 56: 106–116]
- 25 Deng Q D, Zhang P Z, Ran Y K, et al. Basic characteristics of active tectonics of China (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2002, 32: 1020–1031 [邓起东, 张培震, 冉勇康, 等. 中国活动构造基本特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2002, 32: 1020–1031]
- 26 Teng J W, Bai D H, Yang H. Deep processes and dynamic responses associated with the Wenchuan Ms8.0 earthquake of 2008 (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2008, 51: 1385–1402 [滕吉文, 白登海, 杨辉. 2008 汶川 Ms8.0 地震发生的深层过程和动力学响应. *地球物理学报*, 2008, 51: 1385–1402]
- 27 Zhu S B, Zhang P Z. A study on the dynamical mechanisms of the Wenchuan Ms8.0 earthquake, 2008 (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2009, 52: 418–427 [朱守彪, 张培震. 2008 年汶川 Ms8.0 地震发生过程的动力学机制研究. *地球物理学报*, 2008, 52: 418–427]
- 28 Li Y S, Wang Y S, Pei X J, et al. Research on tectonic fracturing and causative fault of Lushan earthquake in Sichuan, China (in Chinese). *J Chengdu Univ Tech*, 2013, 40: 242–249 [李渝生, 王运生, 裴向军, 等. “4.20”芦山地震的构造破裂与发震断层. *成都理工大学学报*, 2013, 40: 242–249]
- 29 Department of Earthquake Prediction of China Earthquake Administration. Wenchuan 8.0 Earthquake Science Research Report (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2009 [中国地震局监测预报司. 汶川 8.0 级地震科学研究报告. 北京: 地震出版社, 2009]
- 30 Zhang Y Q, Dong S W, Hou C T, et al. Preliminary study on the seismotectonics of the 2013 Lushan Ms7.0 earthquake, West Sichuan (in Chinese). *Acta Geol Sin*, 2013, 87: 747–758 [张岳桥, 董树文, 候春堂, 等. 四川芦山 2013 年 Ms7.0 地震发震构造初步研究. *地质学报*, 2013, 87: 747–758]
- 31 Lei X L, Ma S L, Su J R, et al. Inelastic triggering of the 2013 Mw6.6 Lushan earthquake by the 2008 Mw7.9 Wenchuan earthquake (in Chinese). *Seismol Geol*, 2013, 35: 411–422 [雷兴林, 马胜利, 苏金蓉, 等. 汶川地震后中下地壳及上地幔的黏弹性效应引起的应力变化与芦山地震的发生机制. *地震地质*, 2013, 35: 411–422]
- 32 Li Y, Zhou R J, Zhao G H, et al. Thrusting and detachment folding of Lushan earthquake in front of Longmenshan Mountains (in Chinese). *J Chengdu Univ Tech*, 2013, 40: 353–363 [李勇, 周荣军, 赵国华, 等. 龙门山前缘的芦山地震与逆冲-滑脱褶皱作用. *成都理工大学学报*, 2013, 40: 353–363]
- 33 Zhou R J, Li Y, Su J R, et al. Seismogenic structure of Lushan Mw6.6 earthquake, Sichuan, China (in Chinese). *J Chengdu Univ Tech*, 2013, 40: 364–370 [周荣军, 李勇, 苏金蓉, 等. 四川芦山 Mw6.6 级地震发震构造. *成都理工大学学报*, 2013, 40: 364–370]
- 34 Zhang D N, Yuan S Y, Shen Z K. Numerical simulation of the recent crust movement and the fault activities in Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2007, 50: 153–162 [张东宁, 袁松涌, 沈正康. 青藏高原现代地壳运动与活动断裂带关系的模拟实验. *地球物理学报*, 2007, 50: 153–162]
- 35 Teng J W, Yang H, Zhang H S, et al. Wenchuan Ms8.0 earthquake, fine velocity structures of the lithosphere, and dynamical mechanism (in Chinese). *Quat Sci*, 2010, 30: 637–651 [滕吉文, 杨辉, 张洪双, 等. 汶川-映秀 8.0 级大地震的发生与岩石圈精细速度结构和动力机制. *第四纪研究*, 2010, 30: 637–651]
- 36 Ismail-Zadeh A, Mouél J L L, Soloviev A, et al. Numerical modeling of crustal block-and-fault dynamics, earthquakes and slip rates in

- the Tibet-Himalayan region. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 258: 465–485
- 37 Luo G, Liu M. Stress evolution and fault interactions before and after the 2008 Great Wenchuan earthquake. *Tectonophysics*, 2010, 491: 127–140
- 38 Wang H, Cao J L, Zhang H, et al. Numerical simulation of the influence of lower-crustal flow on the deformation of the Sichuan-Yunnan region (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2007, 29: 581–591 [王辉, 曹建玲, 张怀, 等. 川滇地区下地壳流动对上地壳运动变形影响的数值模拟. *地震学报*, 2007, 29: 581–591]
- 39 Liu C, Shi Y L, Zhu B J, et al. Crustal rheology control on the mechanism of the earthquake generation at the Longmen Shan fault (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2014, 57: 404–418 [刘畅, 石耀霖, 朱伯靖, 等. 地壳流变结构控制作用下的龙门山断裂带地震发生机理. *地球物理学报*, 2014, 57: 404–418]
- 40 Zhu A Y, Zhang D N, Jiang C S. Numerical simulation of the relationship between the tectonic stress distribution and the historical strong earthquake activities of the middle-southern segment of eastern boundary of the Sichuan-Yunnan block (in Chinese). *Acta Seismol Sin*, 2015, 37: 762–773 [祝爱玉, 张东宁, 蒋长胜. 川滇地块东边界中南段构造应力分布特征与历史强震活动关系的数值模拟. *地震学报*, 2015, 37: 762–773]
- 41 Automatic Dynamic Incremental Nonlinear Analysis. Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA, Report ARD 10-7. Watertown: ANIAD R&D, Inc., 2010
- 42 Zhu A Y, Zhang D N, Guo Y X. The numerical simulation on the seismogenic mechanism of the Lushan *M*_s 7.0 earthquake constrained by deformation observation (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2016, 59: 1661–1672 [祝爱玉, 张东宁, 郭颖星. 以形变观测为约束的芦山 *M*_s 7.0 地震震害机理数值模拟研究. *地球物理学报*, 2016, 59: 1661–1672]
- 43 Shen Z K, Lü J, Wang M, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau. *J Geophys Res-Solid Earth*, 2005, 110: 1–17
- 44 Shi Y L, Cao J L. Effective viscosity of China continental lithosphere (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2008, 15: 82–95 [石耀霖, 曹建玲. 中国大陆岩石圈等效粘滞系数的计算和讨论. *地学前缘*, 2008, 15: 82–95]
- 45 Sun Y J, Dong S W, Fan T Y, et al. 3D rheological structure of the continental lithosphere beneath China and adjacent regions (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2013, 56: 2936–2946 [孙玉军, 董树文, 范桃园, 等. 中国大陆及邻区岩石圈三维流变结构. *地球物理学报*, 2013, 56: 2936–2946]
- 46 Stolk W, Kaban M, Beekman F, et al. High resolution regional crustal models from irregularly distributed data: Application to Asia and adjacent areas. *Tectonophysics*, 2013, 602: 55–68
- 47 Zhao J, Jiang Z S, Wu Y Q, et al. Study on fault locking and fault slip deficit of the Longmenshan fault zone before the Wenchuan earthquake (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2012, 55: 2963–2972 [赵静, 蒋在森, 武艳强, 等. 汶川地震前龙门山断裂带闭锁程度和滑动亏损分布研究. *地球物理学报*, 2012, 55: 2963–2972]
- 48 Meng X G, Bo W Q, Liu Z G, et al. Activity in the middle east of Bayan Har Block with Lushan *M*_s 7.0 earthquake (in Chinese). *J Jilin Univ*, 2014, 44: 1705–1711 [孟宪纲, 薄万举, 刘志广, 等. 芦山 7.0 级地震与巴颜喀拉块体中东段的活动性. *吉林大学学报*, 2014, 44: 1705–1711]
- 49 Li X G, Yu G H, Xu X W. Surface ruptures in bedrock of the *M*_s 8.0 Wenchuan earthquake (in Chinese). *Seismol Geol*, 2008, 30: 989–995 [李细光, 于贵华, 徐锡伟. 汶川 *M*_s 8.0 地震基岩中的地表破裂. *地震地质*, 2008, 30: 989–995]
- 50 Zhang P Z, Wen X Z, Xu X W, et al. Tectonic model of the great Wenchuan earthquake of May 12, 2008, Sichuan, China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 944–953 [张培震, 闻学泽, 徐锡伟, 等. 2008年汶川 8.0 级特大地震孕育和发生的多单元组合模式. *科学通报*, 2009, 54: 944–953]
- 51 Stein R S, King G C P, Lin J. Change in failures stress on the southern San Andreas fault system caused by the 1992 magnitude=7.4 Landers earthquake. *Science*, 1992, 258: 1328–1332
- 52 King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull Seismol Soc Amer*, 1994, 84: 935–953
- 53 Tsuboi C. Earthquake energy, earthquake volume, aftershock area and strength of earth's crust. *J Phys Earthq*, 1956, 4: 63–66

Summary for “汶川地震对芦山地震孕震环境影响的数值模拟”

Numerical simulation study on the impact of the Wenchuan earthquake to the seismic environment of the Lushan earthquake

GUO YingXing¹, ZHU AiYu¹ & ZHANG DongNing^{1,2*}

¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

² Key Laboratory of Seismic Observation and Geophysical Imaging, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

* Corresponding author, E-mail: zhangdn@cea-igp.ac.cn

The finite element numerical simulation method was used to investigate the impact of the Wenchuan earthquake on the seismic environment of the southern Longmenshan Mountain. The three-dimensional viscoelastic geological model, including the Longmenshan front-range fault, central fault, back-range fault, the Bayan Kala block, and the South China block, was constrained by the results of the geological survey, coseismic dislocation, and the GPS observation of Wenchuan and Lushan earthquakes. We studied how the calculation results were influenced by gravity potential energy caused by high altitude topography, the low velocity layer in the middle crust and the rupture of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults, by modifying the parameters of a model. The Wenchuan earthquake was simulated by reducing the Young's modulus of the possible generating fault. We calculated the Coulomb stress of the Dayi blind fault, Dachuan-Shuangshi fault, and the “Y”-shaped blind thrust fault between the two faults above. The simulation results show that the Coulomb stress has a similar distribution on the fault planes of the southern Longmenshan faults zone caused by the Wenchuan earthquake, considering the low-velocity layer or the double-rupture surface. The Coulomb stress on the top of the Dachuan-Shuangshi fault surface was about 0 MPa, and it gradually reduced towards the southwest direction. At the source of the Lushan earthquake, the Coulomb stress was about -0.02 MPa. For the west branch of “Y”-shaped fault, the Coulomb stress on the fault surface was significantly reduced and was about -0.02 – -0.03 MPa at the source of the Lushan earthquake; after the Wenchuan earthquake, the Coulomb stress on the east branch of the “Y”-shaped fault plane was about -0.01 – -0.03 MPa; for the Dayi fault, the Coulomb stress was increasingly obvious on the fault surface from the southwest to the northwest after the Wenchuan earthquake. Therefore, the Wenchuan earthquake could reduce the risk of an earthquake on the Dachuan-Shuangshi fault and the west branch of “Y”-shaped fault earthquake, but it increases the risk on the east branch of “Y”-shaped fault and the Dayi fault. The maximum Coulomb stress near the source was located on the Dayi fault. Considering the terrain and the simultaneous failure of the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian, the presence of the low velocity layer increases the Coulomb stress on the four faults, and obviously increases towards the east branch of the “Y”-shaped fault and the Dayi fault. If the terrain and the low velocity layer are considered, compared with only the ruptured Beichuan-Yingxiu fault, the Beichuan-Yingxiu and Jiangyou-Guanxian faults' simultaneous rupture increased the risk of earthquakes on the Dachuan-Shuangshi fault, the east branch of “Y”-shaped fault, and the Dayi hidden fault, but reduced the risk of the west branch of “Y” type fault. In any of the above models, the Coulomb stress changes on the four fault planes of southern Longmenshan Mountains were influenced by terrain. In the case of certain crust, mantle medium properties, and spatial structure, the existence of the low velocity layer on the west of the Longmenshan fault zone, the topographic features of the Qinghai-Tibet Plateau to the Sichuan Basin, and the conditions for the simultaneous rupture of the central fault and the front-range fault during the Wenchuan earthquake, are the important factors that affect the Wenchuan earthquake to the Lushan earthquake. Among them, the terrain and low velocity layer have the most significant influence on the Coulomb failure stress for the area around the Lushan earthquake area caused by the Wenchuan earthquake. The effect of terrain features is more obvious in the north section of the selected section, yet the effect of the Wenchuan earthquake simultaneous rupture planes is smaller.

Wenchuan earthquake, Lushan earthquake, seismic environment, Coulomb stress, numerical simulation

doi: 10.1360/N972016-01280