

汶川地震和芦山地震对青藏高原东缘主要活动 断层应力变化的影响

熊 林^{1,2}, 何建坤¹, 潘正洋^{1,2}, 周 云^{1,2}, 刘玉琳³

(1. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘 要:根据弹性无限半空间位错理论,结合汶川地震和芦山地震的同震破裂模型,以及该地区活动断层几何学和运动学特征,应用 Coulomb 程序,计算了 2008 年汶川地震静态库仑应力变化,并和余震分布特征进行对比;同时,计算了 2008 年汶川地震和 2013 年芦山地震共同作用产生的静态库仑应力变化,并将结果投影到青藏高原东缘主要活动断层上。结果表明:汶川地震产生的余震大部分分布在其造成的静态库仑应力增加区;汶川地震在芦山地震震中区域产生的静态库仑应力显著增加,增加值为 0.010~0.050 MPa,汶川地震产生的静态库仑应力变化使得芦山地震提前到来;鲜水河断裂北部、东昆仑断裂、秦岭南缘断裂西段、青川断裂东段、茶坝—林庵寺断裂西段、灌县—江油断裂、大川—双石断裂的静态库仑应力均有不同程度的增加;岷江断裂、虎牙断裂、汶川—茂县断裂、江油—广元断裂、鲜水河断裂南部的静态库仑应力有不同程度的降低;考虑到青藏高原东缘历史大地震和余震分布情况,未来应加强对鲜水河断裂西北段和东昆仑断裂地震危险性的监测与研究。

关键词:地震触发;汶川地震;芦山地震;静态库仑应力;数值模拟;鲜水河断裂;东昆仑断裂;青藏高原中图分类号:P315.2 文献标志码:A

Effects of Wenchuan and Lushan Earthquakes on the Changes of Stress of Main Active Tectonics in the Eastern Edge of Qinghai-Tibet Plateau

XIONG Lin^{1,2}, HE Jian-kun¹, PAN Zheng-yang^{1,2}, ZHOU Yun^{1,2}, LIU Yu-lin³

(1. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Earth and
Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: According to the dislocation theory in elastic infinite half-space and the geometric and kinematic characteristics of active faults, based on the coseismic rupture models of Wenchuan and Lushan earthquakes, changes of static Coulomb stress induced by Wenchuan earthquake in 2008 were calculated by Coulomb software, and were compared with the distribution of aftershocks; changes of static Coulomb stress jointly induced by Wenchuan earthquake in 2008 and Lushan earthquake in 2013 were calculated, and were projected onto main active tectonics in the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau. The results show that most of aftershocks occur in the increase area of static Coulomb stress induced by Wenchuan earthquake; static Coulomb stresses induced by Wenchuan earthquake increase 0.010-0.050 MPa significantly in the epicenter area of Lushan earthquake, and change of static Coulomb stress induced by Wenchuan earthquake leads to the

收稿日期:2014-02-27

基金项目:国家自然科学基金项目(40774050,41030320)

作者简介:熊 林(1989-),男,湖北天门人,中国科学院大学理学硕士研究生,E-mail: xionglin@itpcas.ac.cn.

earlier occurrence of Lushan earthquake; static Coulomb stresses of the northern part of Xianshuihe, East Kunlun, the western segment of Qinling southern frontal, the eastern part of Qingchuan, the western part of Chaba-Lin'ansi, Guanxian-Jianyou and Dachuan-Shuangshi faults increase at different levels; static Coulomb stresses of Minjiang, Huya, Wenchuan-Maoxian, Jiangyou-Guangyuan and the southern part of Xianshuihe faults decrease at different levels; considering the distribution of historical great earthquakes and their aftershocks in the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, monitor and research on the seismic risk in the northwestern part of Xianshuihe fault and East Kunlun fault should be strengthened in future.

Key words: earthquake triggering; Wenchuan earthquake; Lushan earthquake; static Coulomb stress; numerical modeling; Xianshuihe fault; East Kunlun fault; Qinghai-Tibet Plateau

0 引言

近年来,国内外众多学者提出各种模型来计算地震产生的静态库仑应力(简称“应力”)变化及其对后续地震的影响。计算应力变化是一个相对成熟的过程,即由点源或者矩形源在各向均匀半无限空间弹性体内产生变形^[1],然后得出应力变化的空间分布^[2]。一般而言,大地震的发生会改变周边地壳应力状态,而应力的改变会影响活动断层的地震危险性。应力增加的地方,余震发生的概率较大,地震危险性增加;应力减小的区域,余震发生较少,地震危险性减小。1992 年地方性震级(M_L)为 6.1 的 Joshua Tree 地震震后 30 d 的余震分布与应力变化的分布基本一致; M_L 为 7.4 的 Landers 地震 3.5 h 后,发生了 M_L 为 6.5 的 Big Bear 地震,该地震震中造成应力增加 0.22~0.29 MPa^[2]。

2008 年,矩震级(M_w)为 7.9 的汶川地震发生在龙门山断裂中段,造成巨大人员伤亡和财产损失。关于汶川地震造成的应力变化,Parsons 等计算出汶川地震增加了四川盆地的危险区,主震破裂带南段、雅安断层、昆仑断裂平均应力增加较大,熊坡断裂、鲜水河断裂应力略有增加,其中雅安断裂部分区域增加 0.1 MPa^[3];Toda 等计算得出昆仑断裂、鲜水河断裂部分应力增加 0.02 MPa 以上^[4];万永革等计算了由汶川地震导致的周边断层上应力变化数值,应力增加的区域主要集中在龙门山断裂两端、昆仑断裂、鲜水河断裂上的部分位置^[5-7]。随着数据的积累和更多模型的公布,计算更加精确。解朝娣等计算得出应力增加明显的地方是青川断裂和彭县—灌县断裂,这些地方未来发生地震的可能性增加^[8];李玉江等利用三维黏弹性有限元模型,计算得出鲜水河、昆仑断裂的一些区域应力增幅很大^[9]。总而言之,主要断裂上的应力有所增加。

2013 年面波震级(M_s)为 7.0 的芦山地震位于龙门山南部,距离汶川地震震中约 80 km。前人讨论了芦山地震与汶川地震的关系:徐锡伟等认为它们是不相关联的两个地震事件^[10-11];单斌等认为汶川地震加速了芦山地震的到来^[7,12-13],这主要是基于汶川地震对雅安断裂造成的应力变化的增加值超过了 0.01 MPa 的阈值^[1];董培育等探讨了芦山地震造成的应力变化的分布特征^[14-15]。定量的模型计算能更有力地揭示芦山地震和汶川地震的关系。

笔者基于汶川地震与芦山地震有限断层模型,通过 Coulomb 程序^[2,4],在弹性半空间内,计算震后应力变化的格局,进一步明确汶川地震和芦山地震的关系,并讨论二者对周边主要断层应力变化的影响,以期对余震发生趋势和未来地震危险性评估提供参考。

1 研究区地质概况

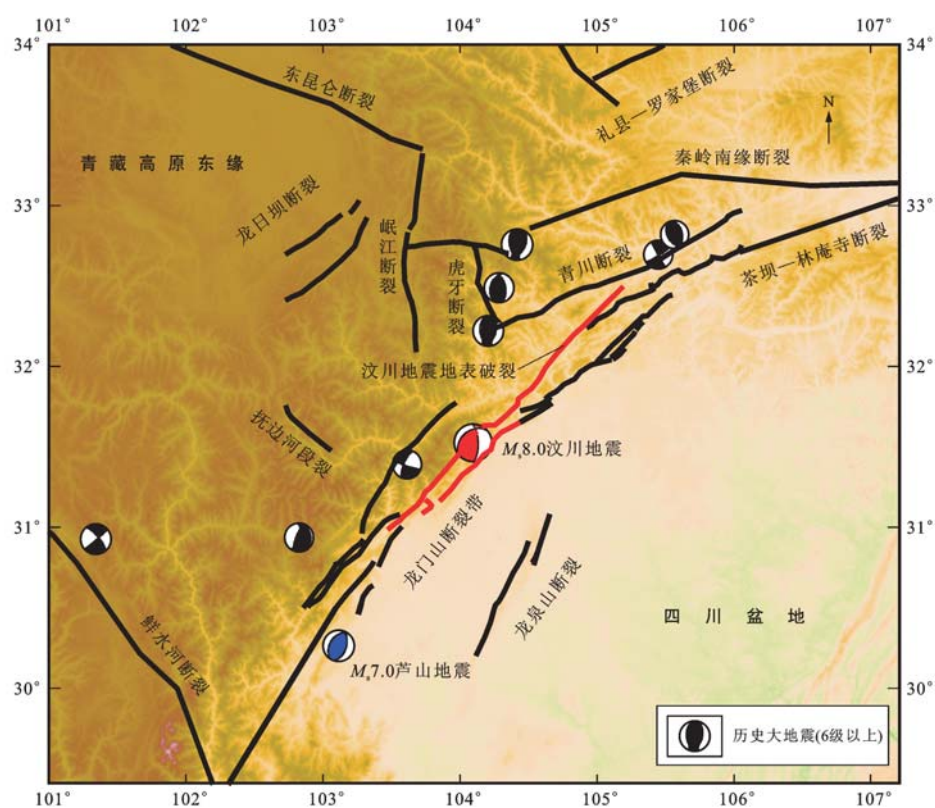
龙门山推覆构造带是华南活动块体的分界线,位于青藏高原东缘。由于印度洋板块和欧亚板块碰撞,青藏高原抬升,物质向东和 SE 向逃逸^[16-17],但受到周边块体的阻挡,从而挤压形成龙门山断裂带^[18-19]。汶川地震发生在其中段,芦山地震则发生在雅安地区(图 1)。雅安地区是中、强地震交汇的地方,该区地块较为完整,新津—蒲江断层和总岗山—高庙断层是该区较大的断裂^[20]。

2 模型建立

计算应力变化是预测后续地震活动的有效方式^[1]。其公式为

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_\beta - \mu' \Delta\sigma_\beta \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma_f$ 是由于触发断层滑动,使得接受断层应力的变化; $\Delta\tau_\beta$ 是剪应力的变化,当与断层滑动方向一致时为正值; $\Delta\sigma_\beta$ 是正应力的变化,拉张时为正值; μ' 是断层的有效摩擦因数。



活动断层地表破裂分布引自文献[5]、[21]和[22];震源机制数据来源于全球矩矩张量计划(Global CMT, <http://www.globalcmt.org>), 时间段为 1976 年 1 月~2014 年 1 月

图 1 研究区活动断层和历史大地震分布

Fig. 1 Distribution of Active Tectonics and Historical Great Earthquakes in Study Area

当 $\Delta\sigma_i > 0$ 时,应力变化为正值,应力增加,缩短了后续地震的发生时间;当 $\Delta\sigma_i < 0$ 时,应力变化为负值,也就是在应力影响区,抑制后续地震的发生。0.01 MPa 通常被认为是能够有效促进后续大地震发生的阈值^[23]。本文采用汶川地震有限断层模型^[24]和芦山地震有限断层模型^[25]。图 2 给出了汶川地震和芦山地震破裂的空间分布特征。

研究区经纬度为 101.0°E~107.2°E、29.4°N~34.1°N。这个范围不仅包含了龙门山断裂带,还涵盖了周边重要断裂带。参数设置方面,泊松比为 0.25,杨氏模量为 80 000 MPa,有效摩擦因数为 0.4,计算深度为 10 km^[1]。计算汶川地震和芦山地震对周围断层应力的影响,是判断断层未来危险性的有效方法^[4]。笔者收集了研究区主要断裂的几何参数(表 1),选取合适的断层分布模型(图 3),得出这些断层上的应力变化分布。

图 3 对活动断裂给予了相应的简化。每个接受断层都会有各自不同的运动方式,即使是同一断层,在不同的具体位置,其产状是不一样的。这些不同在计算应力变化时都将被忽略,笔者只考虑简单的情形:接受断层深度都设置为 20 km。

表 1 主要活动断裂几何学和运动学参数

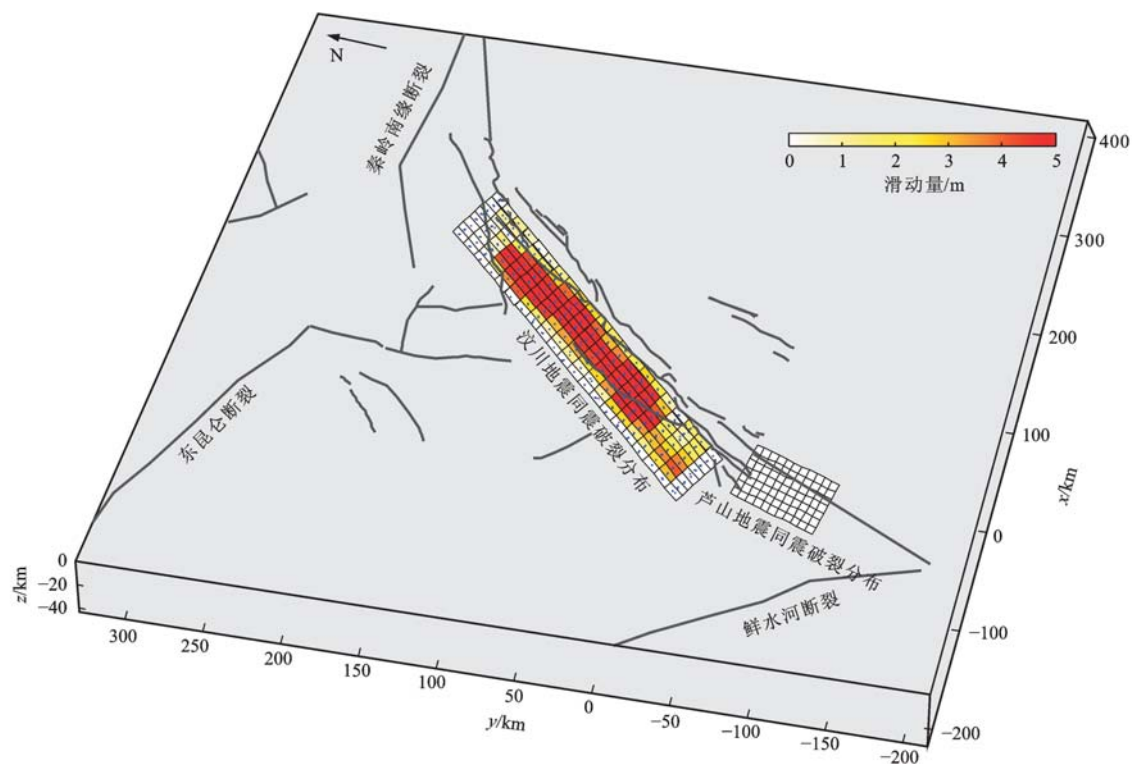
Tab. 1 Geometric and Kinematic Parameters of

Main Active Faults

断裂名称	性质	倾角/(°)	滑动角/(°)	文献来源
映秀—北川断裂	右旋逆冲	35	142	[24]
茂县—汶川断裂	右旋逆冲	70	135	[26]
灌县—江油断裂	逆冲-右旋逆冲	65	90、135	[26]
江油—广元断裂	右旋逆冲	65	135	[26]
茶坝—林庵寺断裂	右旋走滑	55	180	[26]
青川断裂	右旋走滑	65	180	[27]
岷江断裂	左旋逆冲	65	45	[28]
虎牙断裂	逆冲左旋	80	45	[29]
鲜水河断裂	左旋走滑	90	0	[26]
大川—双石断裂	右旋逆冲	55	135	[30]
东昆仑断裂	左旋走滑	90	0	[26]
秦岭南缘断裂	逆冲	75	80	[5]

3 模拟结果

汶川地震的波形记录和初动符号反演得到震源深度 15.4 km,其中走向 229°、倾角 32°、滑动角 118°的一组解与龙门山断裂带的特征一致^[31]。在此破



汶川断层模型源自文献[24];芦山断层模型源自文献[25]; x,y,z 为空间直角坐标系的3个分量; x 指东西向距离, y 指南北向距离, z 指垂直方向深度

图 2 汶川地震和芦山地震破裂的空间分布及同震位移分布

Fig. 2 Coseismic Dislocation and Spatial Distribution of Fractures by Wenchuan and Lushan Earthquakes

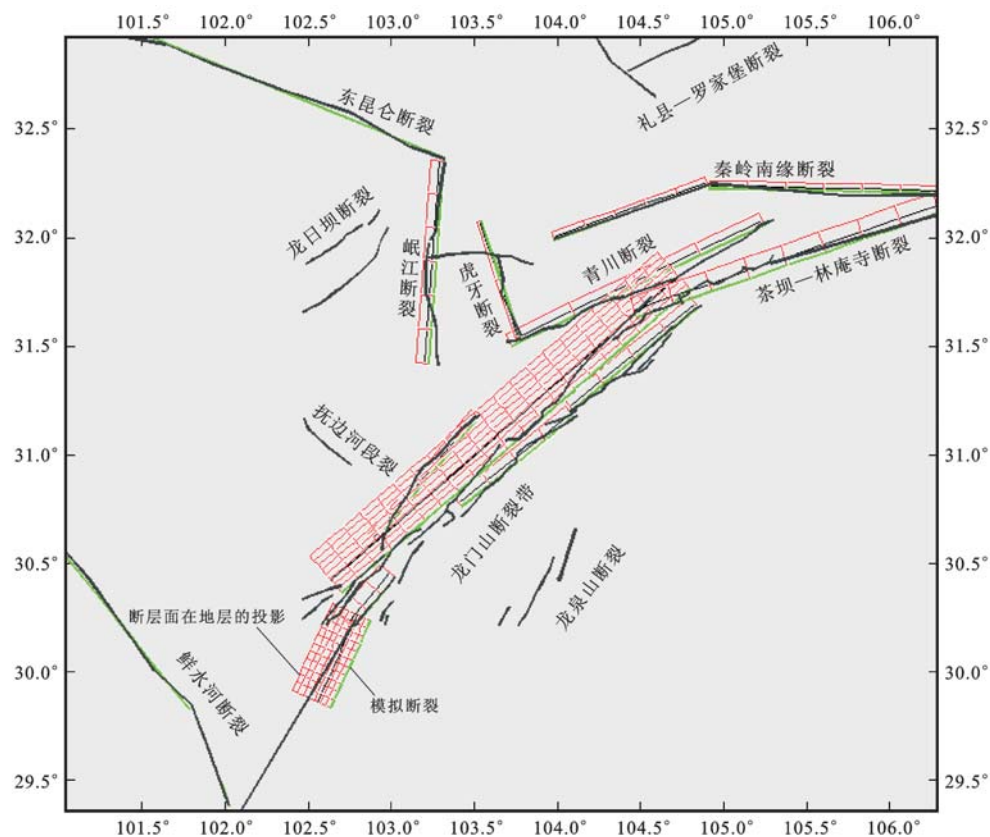
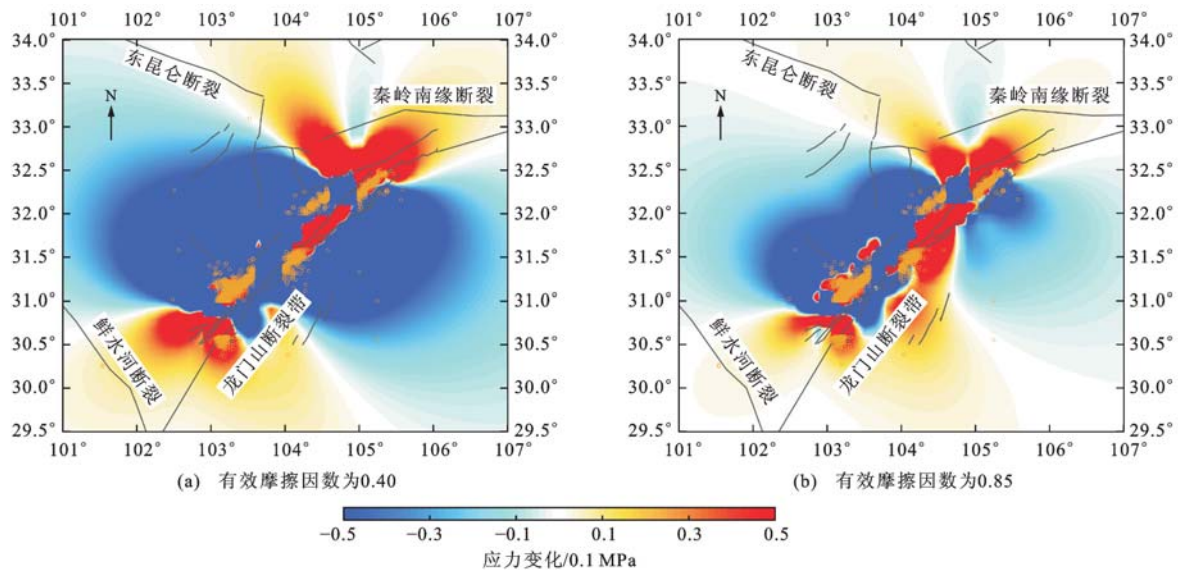


图 3 龙门山地区主要活动断裂分布

Fig. 3 Distribution of Main Active Faults in Longmenshan Area

裂方向上,根据式(1),由滑移量的分布计算得出汶川地震造成的应力变化及其余震分布(图3)。其中,应力变化的空间分布形态与前人研究结果一致。例如,鲜水河断裂大部分区域应力增加(0.01 MPa以上),而本文在鲜水河断裂带上计算的最大增加值约为0.012 MPa,东昆仑断裂部分区域应力增加(从东到西逐渐减少),岷江断裂南段处于应力影区(从东到西逐渐减少)^[3]。本文计算结果与Toda等用Ji的模型得到的计算结果^[4]进行比较,发现主要的应

力影区和应力增强区分布是一致的,但是在局部会稍有差异。例如,昆仑断裂及附近区域都在应力增强区。这种差异主要是因为文献[4]中应力变化图与本文图4在投影方式上不一样导致的。文献[4]中应力变化图的形成较复杂,需要分别计算每个断层所在区域的应力变化,然后不同区域之间通过光滑的插值形成整个研究区的应力分布图;而本文图4计算的是整个区域应力变化在汶川断层几何学方向的投影,可以初步认识总体分布格局。



余震只统计3级以上的,统计截止日期为2008年6月13日

图4 汶川地震造成的应力变化及其余震分布

Fig. 4 Changes of Stress Induced by Wenchuan Earthquake and Distribution of Aftershocks

从图4可以看出,余震主要沿着汶川断层的走向分布。在不同的有效摩擦因数下,大多数都集中在应力增加区,而且是在0.05 MPa以上的区域。比较应力变化分布和余震分布,大多数余震发生在应力增加区,这说明在短时间内,应力增加会触发余震。然而,在平武以南,余震都不在应力增加区,可能与Coulomb程序的计算深度有关。本文给出的计算深度是10 km,而从徐锡伟等得到的汶川地震区域地震构造与震中分布图^[22]可以看到,余震的分布范围是0~20 km深度,但10 km深度是分布最多的,因此,本文选择的计算深度(10 km)是合理的。虽然有少量的余震没有分布在应力增加区,但是同震破裂造成的应力变化还是可以合理说明余震分布情况的。

反演得到芦山地震震源深度为10.2 km。震源机制解的两组结果中,走向为205°,倾角为38.5°,滑动角为88.8°,符合发震断层的地质构造背景^[25]。根据此方向计算汶川地震在芦山地震的破裂面方向上产生的应力变化分布(图5)。计算结果有力地解

释了汶川地震和芦山地震的关系。图5中芦山断层计算深度为10 km。在这个断层上,应力变化的数

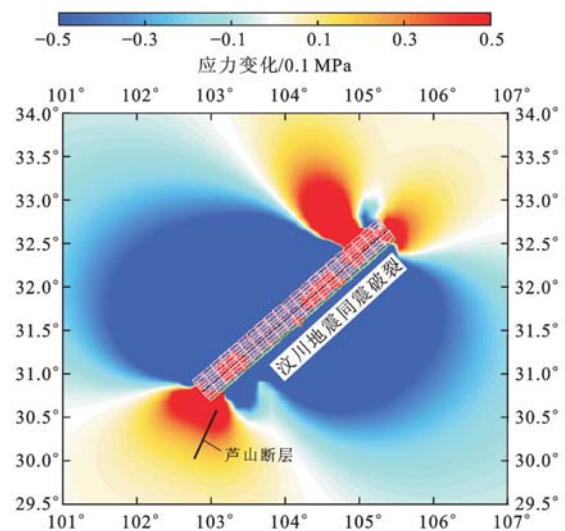


图5 汶川地震对芦山断层造成的应力变化

Fig. 5 Changes of Stress on Lushan Fault Induced by Wenchuan Earthquake

值沿着走向从 NE 到 SW 逐渐减小,最大增加值超过 0.05 MPa,最小增加值为 0.01 MPa。汶川地震在芦山地震震源中心造成的应力变化值约为 0.03 MPa,超过了 0.01 MPa 的临界值。汶川地震之后,芦山断层是非常危险的区域,其发生破裂的时间被

大大提前。该计算结果与前人成果相符^[7,12-13,32-33]。

图 6~10 给出了汶川地震和芦山地震对周边断层造成的应力变化。由于各个断层的几何性质不一样,所以必须分别计算两个地震在各个断层面造成的应力变化。

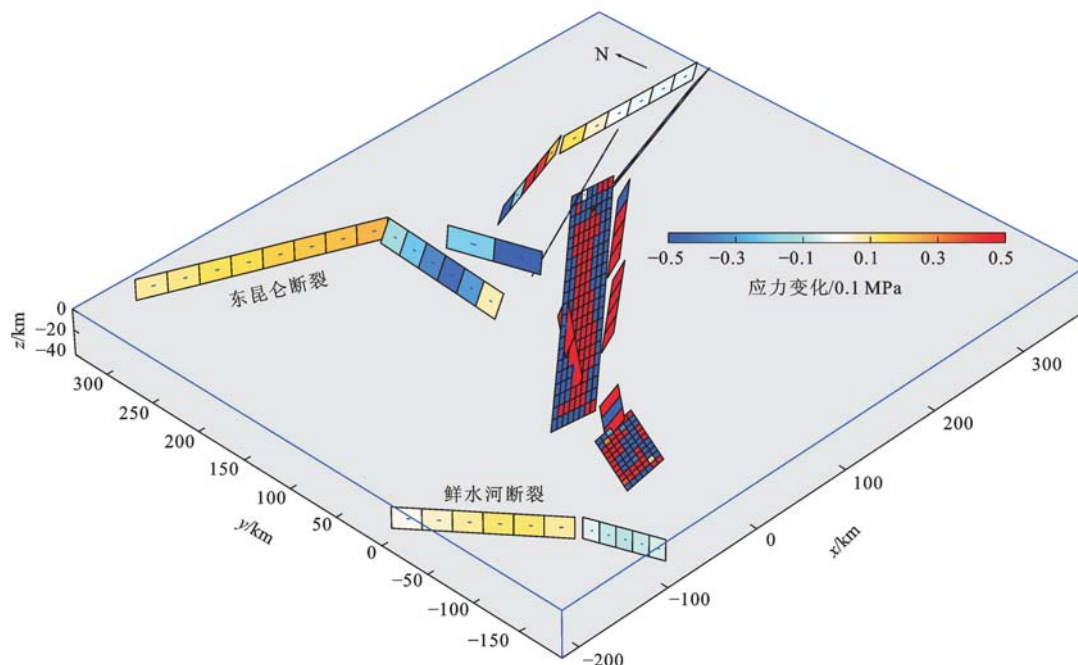


图 6 汶川地震和芦山地震对左旋走滑断层造成的应力变化

Fig. 6 Changes of Stress on Sinistral Strike-slip Faults Induced by Wenchuan and Lushan Earthquakes

图 6 是左旋走滑性质的断层上的应力变化。由图 6 可以看出:鲜水河断裂北段应力是增加的,大部分区域增加值为 0.010~0.012 MPa,应力增加超过了 0.01 MPa 的阈值,该段是地震危险区域,地震可能提前几十年发生^[1],但南段应力是减少的,为 0.010~0.020 MPa;在东昆仑断裂上,应力是增加的,增加值由东到西逐渐减小,最大增加值为 0.025 MPa,最小增加值为 0.010 MPa,因此,研究区域内的东昆仑断裂应力增加值超过 0.010 MPa,今后发生地震的潜在可能性是增加的。

图 7 是右旋走滑性质的断层上的应力变化。由图 7 可以看出:靠近龙门山断裂部分,应力变化很不均匀。茶坝—林庵寺断裂在靠近作为发震断层的映秀—北川断裂附近,应力增加显著,且距离越远,应力增加越小;青川断裂上应力变化比较明显,西段在应力影区,但东段应力增加超过 0.05 MPa。

图 8 是右旋逆冲断层上的应力变化。由图 8 可以看出:茂县—汶川断裂全部位于应力影区,江油—广元断裂大部分应力降低,但是西端应力增加 0.1 MPa 以上,灌县—江油和大川—双石断裂大部

分区域应力增加很大。

图 9 是左旋逆冲断层上的应力变化。由图 9 可以看出:岷江断裂和虎牙断裂都在应力影区,应力降低明显。

图 10 是逆冲断层上的应力变化。由图 10 可以看出:秦岭南缘断裂上的应力增加值由西向东逐渐减少,其东段大部分区域没有受到影响,但西段大部分区域应力增加 0.015~0.025 MPa;结合图 1 中历史大地震的分布,发现已有大地震在附近分布,其造成的应力卸载可能超过本文计算的应力变化数值。

4 讨论

本文计算模型采用的是弹性模型,但是汶川地震距今已有 5 年时间,黏性松弛作用会进一步调整应力的空间分布^[34]。考虑到下地壳黏度为 $(1.0 \sim 10.0) \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,5 年内的松弛是有限的。例如,有效摩擦因数为 0.4 时,汶川地震同震造成的应力变化为 0.006 3 MPa,震后黏性松弛产生的库仑应力变化为 0.001 2 MPa^[7]。同震是震后应力变化值的 5.25 倍,黏性松弛占同震和震后之和的 16%,说

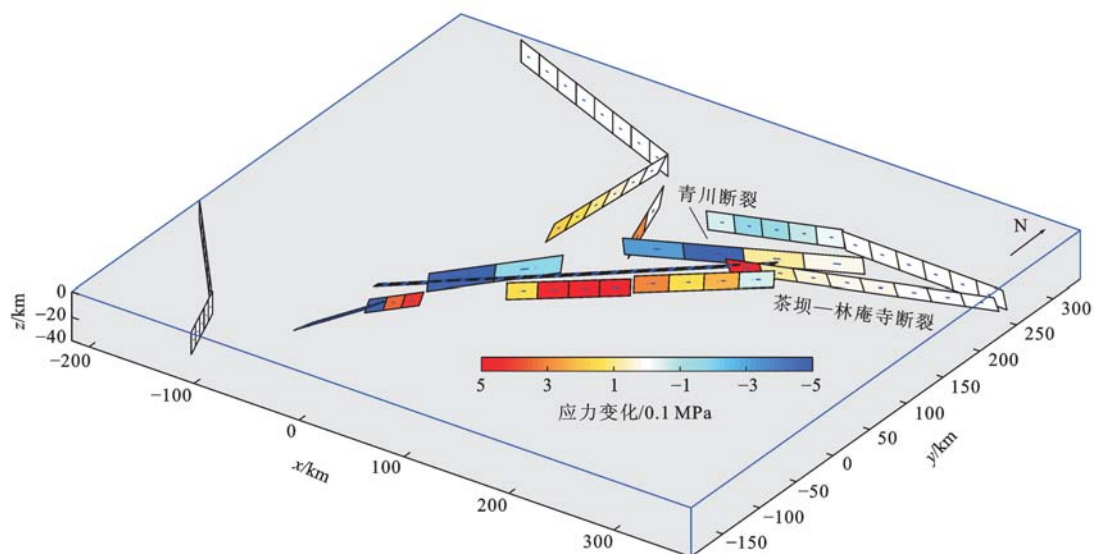


图7 汶川地震和芦山地震对右旋走滑断层造成的应力变化

Fig. 7 Changes of Stress on Dextrograte Strike-slip Faults Induced by Wenchuan and Lushan Earthquakes

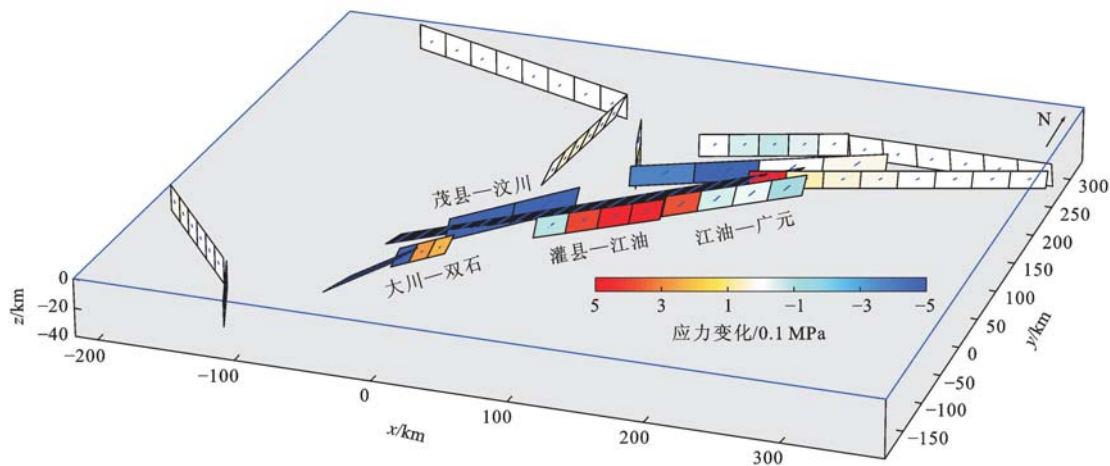


图8 汶川地震和芦山地震对右旋逆冲断层造成的应力变化

Fig. 8 Changes of Stress on Dextrograte Thrust Faults Induced by Wenchuan and Lushan Earthquakes

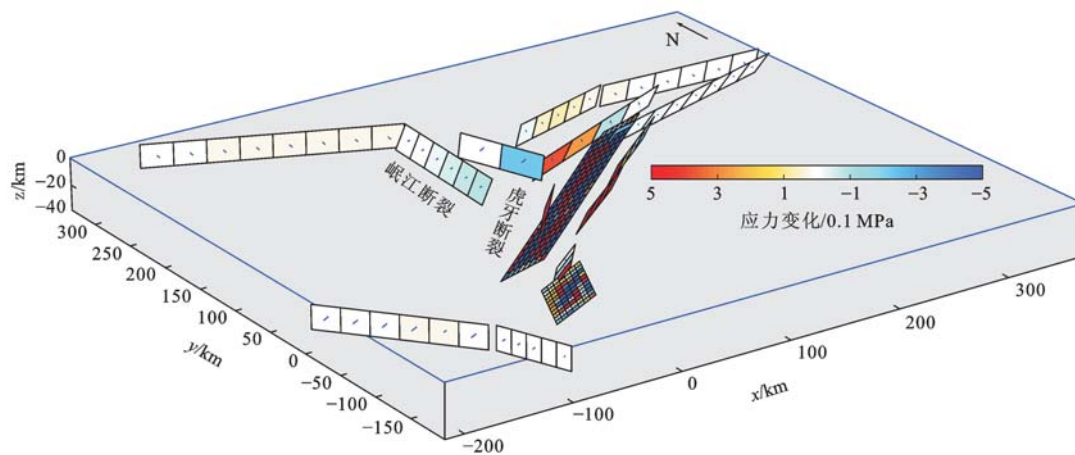


图9 汶川地震和芦山地震对左旋逆冲断层造成的应力变化

Fig. 9 Changes of Stress on Sinistral Thrust Faults Induced by Wenchuan and Lushan Earthquakes

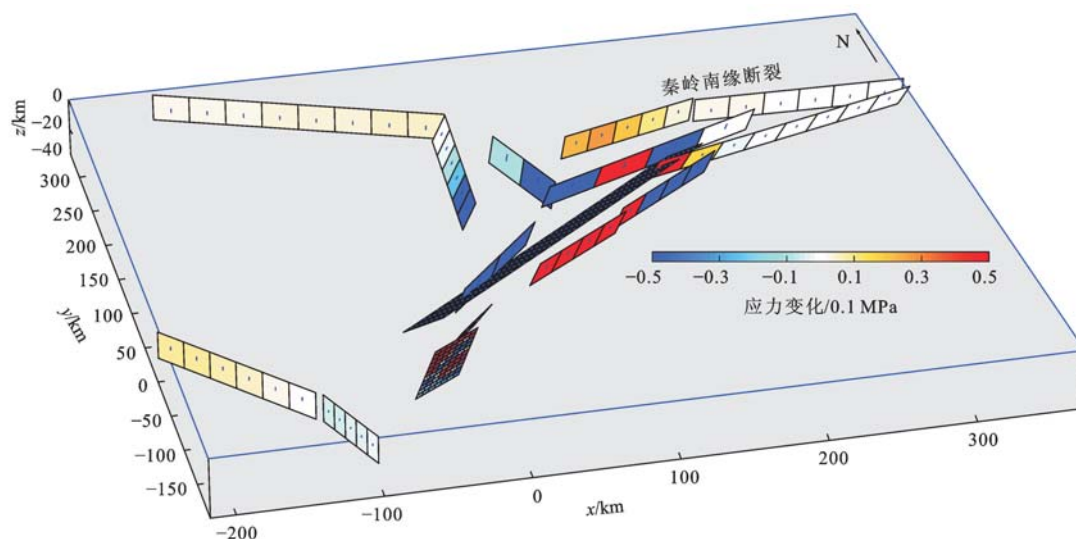


图 10 汶川地震和芦山地震对逆冲断层造成的应力变化

Fig. 10 Changes of Stress on Thrust Faults Induced by Wenchuan and Lushan Earthquakes

明黏性的作用比弹性的作用小得多。另一方面,前人做过相同处理,King 等计算 Landers 地震之前的应力变化时,用弹性应力计算一个相对时间尺度较长的应力分布,得到 1975 年、1979 年、1986 年和 1992 年 4 个 5 级以上地震一起产生的应力变化^[2]。这说明不用黏弹性模型也能说明最主要的问题,也不会改变本文弹性模型计算结果的总体分布格局。但需要指出的是,在远离发震断层的范围内,黏弹性松弛效应造成的应力变化甚至可以超过同震破裂应力变化,这在今后的研究中需加以考虑。一般认为,应力变化是判断未来地震被触发或抑制的重要指标。由于主震产生的应力增加区域是余震集中区域,而且应力增加触发余震的阈值为 0.01 MPa^[23],所以汶川地震和芦山地震在周边断层上引起的应力增加超过 0.01 MPa 的区域应是需要特别关注的地方。

5 结 语

(1) 比较应力增加区和应力减小区内余震分布,大多数余震发生在应力增加区。这说明在短时间内,应力增加会触发余震;少部分余震不在应力增加区,可能与本文计算用到的参数设置(深度、摩擦因数等)有关,还可能与孔隙流体压力、黏弹性松弛有关。

(2) 汶川地震之后,芦山断层是非常危险的区域,其发生破裂的时间被大大提前。2013 年的 $M_s 7.0$ 芦山地震可能是因汶川地震造成的应力增加而提前到来的。

(3) 应力增加并且达到触发阈值的区域有青川断裂中东段、茶坝—林庵寺断裂、大川—双石断裂、灌县—江油断裂、鲜水河断裂北段、东昆仑断裂和秦

岭南缘断裂。前 4 个断裂带虽然应力增加明显,但是灌县—江油断裂已经发生长约 72 km 的地表破裂;其他 3 个断裂已有大量余震分布,应力得到了释放。鲜水河断裂北段应力增加 0.010~0.015 MPa;东昆仑断裂应力增加值由东到西逐渐减小,最大增加值为 0.025 MPa,最小增加值为 0.010 MPa;未来发生大地震的危险性提高了很多,应该加强监测,做好相关防震工作。

(4) 应力计算是在弹性半空间内进行的,但是从长时间来看,地壳不完全是弹性的,而是具有黏弹性的性质,应力发生松弛,因此,预测未来长远地震需要进一步讨论分析,考虑区域构造应力场、孔隙流体、震后余滑等的影响;断层参数的设定需要进一步精确;其他活动断裂(如龙日坝断裂、龙泉山断裂)也是重要的活动断裂,今后也需要加以讨论。

中国科学院青藏高原研究所王卫民副研究员在地震同震破裂反演方面提供了指导,美国地质调查局(USGS)提供了 Coulomb3.0 程序源代码,在此一并表示感谢。

参考文献:

References:

- [1] OKADA Y. Internal Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-space[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(2): 1018-1040.
- [2] KING G C P, STEIN R S, LIN J. Static Stress Changes and the Triggering of Earthquakes[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1994, 84(3): 935-953.
- [3] PARSONS T, JI C, KIRBY E. Stress Changes from

- the 2008 Wenchuan Earthquake and Increased Hazard in the Sichuan Basin[J]. *Nature*, 2008, 454: 509-510.
- [4] 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[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(17): L17305.
- [5] 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[J]. *地震学报*, 2009, 31(2): 128-139.
WAN Yong-ge, SHEN Zheng-kang, SHENG Shu-zhong, et al. The Influence of 2008 Wenchuan Earthquake on Surrounding Faults[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2009, 31(2): 128-139.
- [6] 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[J]. *地震地质*, 2008, 30(4): 935-944.
ZHANG Guo-hong, SHAN Xin-jian, LI Wei-dong. The Coulomb Failure Stress Change Associated with the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake and the Risk Prediction of Its Surrounding Faults[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(4): 935-944.
- [7] 单斌, 熊熊, 郑勇, 等. 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[J]. *中国科学: D辑*, 2009, 39(5): 537-545.
SHAN Bin, XIONG Xiong, ZHENG Yong, et al. Stress Changes on Major Faults Caused by $M_w 7.9$ Wenchuan Earthquake, May 12, 2008[J]. *Science in China: Series D*, 2009, 39(5): 537-545.
- [8] 解朝娣, 朱元清, LEI Xing-lin, 等. $M_s 8.0$ 汶川地震产生的应力变化空间分布及其对地震活动性的影响[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(6): 688-698.
XIE Chao-di, ZHU Yuan-qing, LEI Xing-lin, et al. Pattern of Stress Change and Its Effect on Seismicity Rate Caused by $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 40(6): 688-698.
- [9] 李玉江, 陈连旺, 陆远忠, 等. 汶川地震的发生对周围断层稳定性影响的数值模拟[J]. *地球科学*, 2013, 38(2): 398-410.
LI Yu-jiang, CHEN Lian-wang, LU Yuan-zhong, et al. Numerical Simulation on Influences of Wenchuan Earthquake on the Stability of Faults in the Neighborhood[J]. *Earth Science*, 2013, 38(2): 398-410.
- [10] 徐锡伟, 陈桂华, 于贵华, 等. 芦山地震发震构造及其与汶川地震关系讨论[J]. *地学前缘*, 2013, 20(3): 11-20.
XU Xi-wei, CHEN Gui-hua, YU Gui-hua, et al. Seismogenic Structure of Lushan Earthquake and Its Relationship with Wenchuan Earthquake[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 11-20.
- [11] 杜方, 龙锋, 阮祥, 等. 四川芦山 7.0 级地震及其与汶川 8.0 级地震的关系[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5): 1772-1783.
DU Fang, LONG Feng, RUAN Xiang, et al. The $M 7.0$ Lushan Earthquake and the Relationship with the $M 8.0$ Wenchuan Earthquake in Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5): 1772-1783.
- [12] WU J C, YU S, CAI Y J, et al. Stress Triggering of the Lushan $M 7.0$ Earthquake by the Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2013, 4(3): 35-39.
- [13] 缪森, 朱守彪. 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[J]. *地震学报*, 2013, 35(5): 619-631.
MIAO Miao, ZHU Shou-biao. The Static Coulomb Stress Change of the 2013 Lushan $M_s 7.0$ Earthquake and Its Impact on the Spatial Distribution of Aftershocks[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2013, 35(5): 619-631.
- [14] 董培育, 程惠红, 曾祥方, 等. 四川芦山 $M_s 7.0$ 级地震导致周边断层的应力变化[J]. *科技导报*, 2013, 31(12): 19-22.
DONG Pei-yu, CHENG Hui-hong, ZENG Xiang-fang, et al. Stress Changes on Major Faults Caused by $M_s 7.0$ Lushan Earthquake[J]. *Science and Technology Review*, 2013, 31(12): 19-22.
- [15] 张红艳, 谢富仁, 崔效锋. 四川芦山地震区域构造环境与构造应力场特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2013, 35(2): 99-106.
ZHANG Hong-yan, XIE Fu-ren, CUI Xiao-feng. Regional Characteristics of Tectonic Stress Field and Tectonic Setting of Lushan Earthquake in Sichuan[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2013, 35(2): 99-106.
- [16] TAPPONNIER P, PELTZER G, LE DAIN A Y, et al. Propagating Extrusion Tectonics in Asia: New Insights from Simple Experiments with Plasticine[J]. *Geology*, 1982, 10(12): 611-616.
- [17] ZHANG P Z, SHEN Z K, WANG M, et al. Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Positioning System Data[J]. *Geology*, 2004, 32(9): 809-812.
- [18] 邓起东, 陈社发, 赵小麟. 龙门山及其邻区的构造和地震活动及动力学[J]. *地震地质*, 1994, 16(4): 389-403.
DENG Qi-dong, CHEN She-fa, ZHAO Xiao-lin. Tectonics, Seismicity and Dynamics of Longmenshan Mountains and Its Adjacent Regions[J]. *Seismology and Geology*, 1994, 16(4): 389-403.
- [19] 徐锡伟, 于贵华, 马文涛, 等. 中国大陆中轴构造带地壳最新构造变动样式及其动力学内涵[J]. *地学前缘*,

- 2003, 10(增 1):160-167.
- XU Xi-wei, YU Gui-hua, MA Wen-tao, et al. Model of Latest Crustal Tectonic Motion of the Central Tectonic Zone on the Mainland of China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003, 10(S1):160-167.
- [20] 赵友年, 蒋良志, 魏继裕, 等. 雅安地区地震地质特征与地震活动性研究[J]. *四川地震*, 1990(2):1-48.
- ZHAO You-nian, JIANG Liang-zhi, WEI Ji-yu, et al. Seismic Feature and Seismicity in Ya'an Area[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, 1990(2):1-48.
- [21] 邵志刚, 周龙泉, 蒋长胜, 等. 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震对周边断层地震活动的影响[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(8):1784-1795.
- SHAO Zhi-gang, ZHOU Long-quan, JIANG Chang-sheng, et al. The Impact of Wenchuan $M_s 8.0$ Earthquake on the Seismic Activity of Surrounding Faults[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(8):1784-1795.
- [22] 徐锡伟, 闻学泽, 叶建青, 等. 汶川 $M_s 8.0$ 地震地表破裂带及其发震构造[J]. *地震地质*, 2008, 30(3):597-629.
- XU Xi-wei, WEN Xue-ze, YE Jian-qing, et al. The $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake Surface Ruptures and Its Seismogenic Structure[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(3):597-629.
- [23] HARRIS R A. Introduction to Special Section: Stress Triggers, Stress Shadows, and Implications for Seismic Hazard[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1998, 103(B10):24347-24358.
- [24] JI C. Preliminary Result of the May 12, 2008 $M_w 7.97$ Sichuan Earthquake [EB/OL]. (2008-05-20) [2012-12-08]. http://www.geol.ucsb.edu/faculty/ji/big_earthquakes/2008/05/12/ShiChuan.html.
- [25] 王卫民, 郝金来, 姚振兴. 2013 年 4 月 20 日四川芦山地震震源破裂过程反演初步结果[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(4):1412-1417.
- WANG Wei-min, HAO Jin-lai, YAO Zhen-xing. Preliminary Result for Rupture Process of Apr. 20, 2013, Lushan Earthquake, Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4):1412-1417.
- [26] 王凯英, 马胜利. 2008 年汶川地震的破裂模型及引起的余震活动分析[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(6):1511-1516.
- WANG Kai-yin, MA Sheng-li. Analysis of Co-seismic Rupture Models for 2008 Wenchuan Earthquake and Relations with Aftershock[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(6):1511-1516.
- [27] 樊春, 王二七, 王刚, 等. 龙门山断裂带北段晚新近纪以来的右行走滑运动及其构造变换研究: 以青川断裂为例[J]. *地质科学*, 2008, 43(3):417-433.
- FAN Chun, WANG Er-qi, WANG Gang, et al. Dextral Strike-slip and Tectonic Transformation of the Northern Longmen Shan Fault Belt from Late Neogene: A Case Study from the Qingchuan Fault[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2008, 43(3):417-433.
- [28] 司建涛, 刘顺. 青藏高原东缘岷江断裂构造特征、变形序列和演化历史[J]. *四川地质学报*, 2008, 28(1):1-5.
- SI Jian-tao, LIU Shun. Geological Features, Deformation Sequence and Evolution of the Minjiang Fault on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2008, 28(1):1-5.
- [29] 周荣军, 李勇, DENSMORE A L, 等. 青藏高原东缘活动构造[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(2):40-51.
- ZHOU Rong-jun, LI Yong, DENSMORE A L, et al. Active Tectonics of the Eastern Margin of the Tibet Plateau[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(2):40-51.
- [30] 杨晓平, 蒋溥, 宋方敏, 等. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据[J]. *地震地质*, 1999, 21(4):341-345.
- YANG Xiao-ping, JIANG Pu, SONG Fang-min, et al. The Evidence of the South Longmenshan Fault Zones Cutting Late Quaternary Stratum[J]. *Seismology and Geology*, 1999, 21(4):341-345.
- [31] 王卫民, 赵连锋, 李娟, 等. 四川汶川 8.0 级地震震源过程[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(5):1403-1410.
- WANG Wei-min, ZHAO Lian-feng, LI Juan, et al. Rupture Process of the $M_s 8.0$ Wenchuan Earthquake of Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(5):1403-1410.
- [32] 陈运泰, 杨智娴, 张勇, 等. 从汶川地震到芦山地震[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(6):1064-1072.
- CHEN Yun-tai, YANG Zhi-xian, ZHANG Yong, et al. From 2008 Wenchuan Earthquake to 2013 Lushan Earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(6):1064-1072.
- [33] 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[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(6):1002-1009.
- SHAN Bin, XIONG Xiong, ZHENG Yong, et al. Stress Changes on Major Faults Caused by 2013 Lushan Earthquake, and Its Relationship with 2008 Wenchuan Earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2013, 43(6):1002-1009.
- [34] FREED A M, LIN J. Delayed Triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by Viscoelastic Stress Transfer[J]. *Nature*, 2001, 411:180-183.