

黄禄渊, 程惠红, 张怀等. 2019. 2008 年汶川地震同震-震后应力演化及其对 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震的影响. 地球物理学报, 62(4):1268-1281, doi:10.6038/cjg2019L0545.

Huang L Y, Cheng H H, Zhang H, et al. 2019. Coseismic and postseismic stress evolution caused by the 2008 Wenchuan earthquake and its effects on the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 62(4):1268-1281, doi:10.6038/cjg2019L0545.

2008 年汶川地震同震-震后应力演化及其对 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震的影响

黄禄渊^{1,3}, 程惠红^{2*}, 张怀², 高锐¹, 石耀霖²

¹ 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

² 中国科学院大学, 计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

³ 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要 2017 年 8 月 8 日四川九寨沟发生了 M_s 7.0 地震, 距离汶川地震震中约为 140km. 地震的发生会调整区域应力分布和影响区域地震活动性变化. 那么, 汶川地震的发生对此次九寨沟地震有何影响? 区域应力如何演化? 为回答这些问题, 本研究基于高性能并行有限元方法和网格自适应加密技术, 采用含地形起伏的黏弹非均匀椭球型地球模型, 分别计算了汶川地震引起的同震-震后应力时空动态演化及其对此次九寨沟地震的影响. 同时, 考虑同震静态应力和震后黏弹性应力调整, 计算了汶川、芦山和九寨沟地震的发生对周边断层应力积累的影响. 计算结果显示汶川地震对九寨沟发震断层的同震库仑应力加载约为 0.008 MPa, 震后 9 年的黏弹性应力加载约为 0.012~0.016 MPa, 可能会使九寨沟地震提前发生. 此外, 汶川、芦山和九寨沟地震的发生引起龙门山断裂映秀以南段、东昆仑断裂、龙日坝断裂东段和岷江断裂北段及鲜水河断裂康定段应力加载大于 0.01 MPa, 增加了这些断裂带发生地震的危险性.

关键词 九寨沟地震; 汶川地震; 震后形变; 有限元模拟; 库仑应力变化

doi:10.6038/cjg2019L0545

中图分类号 P315

收稿日期 2017-09-01, 2018-12-18 收修定稿

Coseismic and postseismic stress evolution caused by the 2008 Wenchuan earthquake and its effects on the 2017 M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake

HUANG LuYuan^{1,3}, CHENG HuiHong^{2*}, ZHANG Huai², GAO Rui¹, SHI YaoLin²

¹ Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

² Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract On 8 August 2017, an M_s 7.0 earthquake occurred in Jiuzhaigou County, Sichuan Province, about 140 km to the epicenter of the 2008 Wenchuan M_s 8.0 earthquake. Generally, both the coseismic and postseismic stress changes due to a great earthquake are sufficiently large to disturb local tectonic stress and seismicity. Therefore, how would stress change due to the

基金项目 国家自然科学基金重大项目(41590865)、国家自然科学基金青年基金(41704097)、国家自然科学基金青年基金(41604077)、中国大陆综合地球物理场观测仪器研发专项(Y201706)和中央级科研院所基本科研业务专项项目(ZDJ2017-12)联合资助.

第一作者简介 黄禄渊, 男, 助理研究员, 主要从事地球动力学研究. E-mail: Pekinghly@163.com

* 通讯作者 程惠红, 女, 副教授, 主要从事地球动力学和水库地震触发研究. E-mail: chenghuihong@163.com

Wenchuan earthquake and what is its effect on the Jiuzhaigou earthquake? And how had the local stress changed? Here, we address these questions using a 3-D visco-elastic model. Based on high performance parallel computing and Adaptive Mesh Refinement (AMR) technique, we build a lateral heterogeneous ellipsoidal Earth model to calculate visco-elastic deformation, stress changes and the Coulomb Failure Stress changes (Δ CFS) induced by the Wenchuan earthquake. Moreover, we calculate the Δ CFS on nearby faults from coseismic and postseismic stress induced by the the Wenchuan, Lushan and Jiuzhaigou earthquakes, respectively. Results show that the coseismic Δ CFS on the hypocenter of the Jiuzhaigou earthquake caused by the Wenchuan earthquake is about 0.008 MPa, while the postseismic Δ CFS is up to 0.012~0.016 MPa which means several years ahead of the Jiuzhaigou earthquake. The Δ CFS of nearby major faults in this region, such as the southern segment of the Longmenshan, East Kunlun, Longriba, northern segment of the Minjiang, Kangding segment of the Xianshuihe faults, caused by the Wenchuan, Lushan and Jiuzhaigou earthquakes are all greater than 0.01 MPa, increasing the seismic risks of these faults.

Keywords Jiuzhaigou earthquake; Wenchuan earthquake; Post-seismic deformation; Finite element method; Coulomb stress change

0 引言

2017 年 8 月 8 日 21 时 19 分,四川省阿坝州九寨沟县(北纬 33.20° ,东经 103.82°)发生 M_s 7.0 级地震,震源深度 20 km(中国地震台网 <http://news.ceic.ac.cn/CC20170808211947.html>, [2017-08-08]). 该地震距 2008 年汶川地震约 9 年,震中距汶川地震地表破裂带北段仅数十公里。另外,在九寨沟地震发生 4 年之前,2013 年 4 月 20 日在龙门山推覆构造带上发生了芦山 M_s 7.0 级地震(震中距汶川地震约 90 km)。这三次大地震均发生于巴颜喀拉地块和四川盆地的耦合带,青藏高原物质东移受四川盆地阻挡,在此处地壳运动方向由东南向过渡为南向明显偏转,产生向南逃逸运动趋势,见图 1。甘孜—玉树—鲜水河断裂带、东昆仑断裂带、岷江断裂带、龙门山断裂带中南段将巴颜喀拉地块围限(徐锡伟等,2008)。其中,该块体东边界的龙门山断裂带具有明显地震活动分段性,北东段地震活动性较弱(李传友等,2004;贾秋鹏等,2007),中南段不仅是川西高原与四川盆地剧烈地形高差过渡带,也是历史和现今地震活动带(贾秋鹏等,2007)。东昆仑断裂带东端向南发生较大角度的偏转,在此形成数条帚状散开分支断裂,与龙日坝断裂、岷江断裂和虎牙断裂相交,断层习性由走滑逐步转换为逆冲(季灵运等,2017)。岷江断裂带走向近南北向,由岷江和虎牙断裂组成,分别位于松潘北和松潘南东。岷江断裂以逆冲为主,垂直运动速率 $1.6\sim 1.9\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (Wang et al., 2008)。虎牙断裂

左旋走滑速率约 $1.4\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (杨晓平和邓忠文,1999)。龙日坝断裂带分割阿坝和龙门山次级块体,右旋走滑速率约 $5.3\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ (徐锡伟等,2008)。巴颜喀拉地块内部活动断裂影响着青藏高原东向运动受四川盆地阻挡时的物质、能量重分配过程,探索其内部地震发生规律有助于认识青藏高原地震活动性。

地震发生是应力释放的过程,会调整区域应力分布,影响区域地震活动性。许多学者对巴颜喀拉块体强震间的应力触发问题做了大量研究。例如:程佳等(2011)讨论了 1997 年以来巴颜喀拉块体发生的玛尼、昆仑山口西、汶川和玉树地震之间的应力触发关系。汪建军和许才军(2009)计算了玛尼地震对昆仑山口西地震影响,由于震中距较远,玛尼地震对昆仑山口西地震的应力加载小于 0.01 MPa 阈值。沈正康等(2003)计算了东昆仑活动断裂大震间的黏弹应力触发,得到了 1937 年花石峡、1963 年都兰地震和 1997 年玛尼地震对 2001 年昆仑山口西地震库仑应力加载随时间变化规律,结果显示黏弹性松弛应力远大于同震应力。那么,2008 年汶川 M_s 8.0 和 2013 年芦山 M_s 7.0 地震对此次九寨沟地震的发生有何影响?湖北省地震局 GNSS 学科应急组提供的 2008—2015 年 GPS 形变观测(<http://www.cgps.ac.cn/cgs/viewArticleNormal.action?id=401>, [2017-08-09])显示,汶川地震导致九寨沟地区震后形变显著,形变约 2~4 cm。汶川地震震后九年库仑应力如何演化?对 2017 年九寨沟 M_s 7.0 地震是否具有黏弹性触发作用?汶川地震、芦山地震和此次

和地形起伏的网格模型生成步骤如下:第一步,生成无地形的球形网格;第二步,根据 ETOPO 1.0 模型计算地表各节点的移动量,将地表节点移动到目标位置;第三步,为避免移动节点引起网格畸变,需以地球模型为求解域求解一个 Poisson 方程,得到内部节点的移动量,并将内部节点移动到目标位置(程惠红等, 2017). 对于黏弹性参数的设置,特别是龙门山两侧的川西高原和四川盆地,我们主要参考前人(石耀霖和曹建玲, 2008; Shao et al., 2011; 柳畅等, 2012)的已有成果,其余区域黏度结构采用 Mitrovica 和 Forte (2004) 根据冰后均衡和地幔对流联合反演给出的径向一维黏度结果. 计算模型中采用“弹性位错等效体力方法”(张贝等, 2015)处理发震断层的静态滑动. 对包含位错的单元,在单元积分时位错被等效成体力添加到力学平衡方程右端项. 为避免计算中过疏网格难以达到求解精度或过密网格带来的计算代价大增,采用网格自适应技术,据误差识别自动调整网格的疏密度. 图 2 给出了此次椭球型非均质球体计算网格,且对发震断层处进行局部加密,加密后模型含(带悬点)六面体单元 3934446,节点 4250744.

1.2 控制方程

对地震引起的位移和应力演化,通过求解平衡方程(1)实现,即:

$$\frac{\sigma_{ij}}{x_j} + f_i = 0, \quad (1)$$

几何方程为

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{u_i}{x_j} + \frac{u_j}{x_i} \right), \quad (2)$$

各向同性材料的三维黏弹性积分型本构关系可写为

$$\sigma_{ij}(t_n) = \int_0^t E_{ijkl}(t-\tau) \frac{d\epsilon_{kl}(\tau)}{d\tau} d\tau + E_{ijkl}(t)\epsilon_{kl}(0), \quad (3)$$

式中, E_{ijkl} 为松弛函数, ϵ_{kl} 为应变, σ_{ij} 为应力. 在小应变假设条件下,足够小时间增量 Δt_n 内应变率可以视为常数,经推导可得应力递推公式为(黄禄渊, 2016):

$$\sigma_{ij}(t_n) = \frac{(1 - \exp(-\Delta t_n/\lambda))\lambda}{\Delta t_n} E_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl}(t_n) + \exp(-\Delta t_n/\lambda) \sigma_{ij}(t_{n-1}). \quad (4)$$

假设体积形变和剪切形变解耦,则对由 1 个弹簧和 N 个 Maxwell 体链并联的广义 Maxwell 体,体积模量和剪切模量松弛函数可分别用 Prony 级数表示,即:

$$K_{ijkl}(t) = K_{ijkl} + \sum_{n=1}^N K_{ijkl}^n \exp(1-t/\lambda^n), \quad (5)$$

$$G_{ijkl}(t) = G_{ijkl} + \sum_{n=1}^N G_{ijkl}^n \exp(1-t/\lambda^n), \quad (6)$$

式中, K_{ijkl} 和 G_{ijkl} 分别为时间无穷时刻的体积模量和剪切模量, N 为 Maxwell 链数目, λ 为松弛时间. 一般认为地球介质体积模量不随时间衰减,即体积变形为弹性,剪切变形为黏弹性. 对于 Maxwell 体,剪切模量和体积模量分别可写为

$$K_{ijkl}(t) = K_{ijkl}, \quad (7)$$

$$G_{ijkl}(t) = G_{ijkl} \exp(-t/\lambda). \quad (8)$$

在张贝等(2015)发展的“弹性位错等效体力方法”基础上,基于 Deal II 平台,我们根据上述控制方程进一步发展了横向非均匀椭球形黏弹地球位错并行计算程序. 该程序的正确性已经通过和 Pollitz (1992)半解析黏弹地球位错模型比较得到验证.

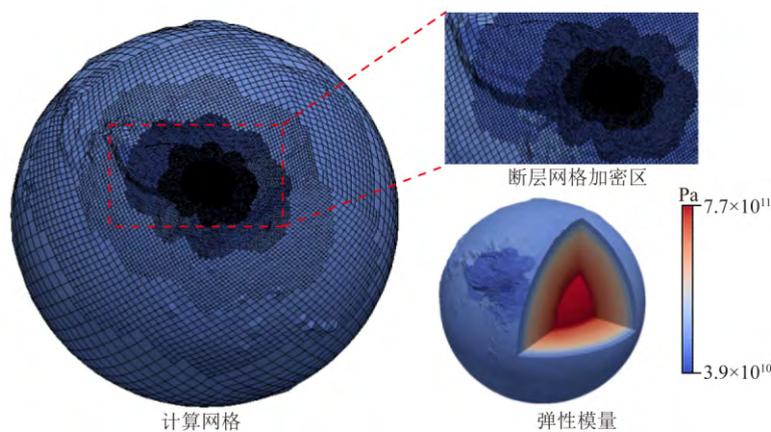


图 2 全球计算模型网格与非均质弹性模量显示(地形夸张 30 倍)

Fig. 2 Computational grid and heterogeneous elastic parameters(The topography is vertically exaggerated by 30 times to highlight the elevation)

1.3 地震滑动模型及 GPS 数据

滑动模型对同震-震后计算有重要影响,据此分别选择现有公开发布的滑动模型来计算汶川和芦山地震同震-震后应力分布及此次九寨沟地震同震应力变化. 本研究中,汶川地震滑动模型采用 Ji 和 Hayes(2008)模型和 Fielding 等(2013)模型;芦山地震震源模型采用陈运泰等(2013)的滑动模型;九寨沟地震滑动模型采用陈运泰院士课题组反演的静态滑动分布(<http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/275883.html>),同震 GPS 数据源自 Wang 等(2011b),震后 GPS 数据采用的湖北省地震局 GNSS 学科应急组提供的汶川地震震后 2008—2015 年 GPS 形变

观测(<http://www.cgps.ac.cn/cgs/viewArticleNormal.action?id=401>),接收断层参数参考了(Parsons et al., 2008; Wan and Shen, 2010; 单斌等, 2013),其中九寨沟地震所在断层按照陈运泰院士课题组反演的静态滑动分布断层给出,具体见表 1. 野外地质考察将隐伏的九寨沟地震发震断层命名为树正断裂,重新精定位的余震数据为九寨沟地震断层空间几何分布提供了很好约束,并且根据九寨沟地震发震断层几何产状、震源机制解和隐伏性质与虎牙断裂北西段的相似性,不排除九寨沟地震断层是虎牙断裂北西段的延伸(季灵运等, 2017; 易桂喜等, 2017).

表 1 断层几何参数

Table 1 Geometric parameters of faults

编号	断层名称	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)	编号	断层名称	走向/(°)	倾角/(°)	滑动角/(°)
1	东昆仑断裂	108	70	15	9	安宁河断裂	1	90	45
2	西秦岭断裂东段	93	60	15	10	大凉山断裂	349	75	0
3	秦岭南缘东段	265	75	80	11	马边—盐津断裂	91	90	0
4	秦岭南缘西段	272	75	80	12	龙门山断裂北段	265	90	180
5	岷江断裂	357	75	45	13	龙门山断裂南段	241	43	90
6	龙日坝断裂	50	90	180	14	雅安断裂	34	55	87
7	鲜水河断裂	326	90	0	15	九寨沟地震断裂	151	83	-13
8	小江河断裂	36	75	0	16	虎牙断裂	150	75	0

2 计算结果

目前,因背景构造应力场绝对值获取难度大,广大学者现采用库仑应力变化(ΔCFS)进行地震同震-震后触发和地震危险性研究(Harris, 1998; 石耀霖和曹建玲, 2010). 在利用公式(1)—(8)得到有限元计算结果后,可利用有限元得到应力变化值来计算库仑应力变化. 忽略地震同震和震后的摩擦系数改变,则库仑应力变化可表示为

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu(\Delta\sigma_n + \Delta P), \quad (9)$$

式中, ΔCFS 代表库仑应力变化, $\Delta\tau$ 和 $\Delta\sigma_n$ 分别代表断层面剪应力变化(与滑动矢量同向为正)和正应力变化(拉伸为正), ΔP 为孔隙水压变化, μ 为断层面摩擦系数. 实际计算中,孔隙水压的作用经常通过视摩擦系数 μ' 来体现,即:

$$\Delta CFS = \Delta\tau + \mu'\Delta\sigma_n, \quad (10)$$

其中,滑动速率较大的走滑断层、正断层视摩擦系数常取 0.2~0.4,滑动速率较小的逆冲断层摩擦系数常取 0.6~0.8(Parsonset al., 1999). 本研究中视摩

擦系数分别取 0.0、0.4 和 0.8 进行计算.

2.1 2008 年汶川地震同震库仑应力变化

汶川地震发生后,不同研究者根据地表破裂信息和 GPS 数据及地震学数据得到了众多滑动模型(Ji and Hayes, 2008; Wang et al., 2011b; Fielding et al., 2013). 图 3 分别给出了 Ji 和 Hayes(2008)模型、Fielding 等(2013)模型计算汶川地震同震位移场,前者利用远震波形数据反演,后者由 InSAR 和 GPS 以及远震波形数据联合反演得到. 由于地震滑动模型不是本文主要研究目标,且经比较 Fielding 等(2013)模型得到的位移模拟值和观测值吻合度更高,因此,本文汶川地震同震和震后计算中的滑动模型均采用 Fielding 等(2013)模型.

图 4 给出了利用表 1 接收断层参数,将汶川地震引起的地震应力降投影到断层上得到的库仑应力变化,断层计算深度为 0~30 km. 根据库仑应力变化(图 4b)和断层滑动模型(图 4d),龙门山断裂主破裂区的北川—映秀段在超过 10 km 深度库仑应力变化为负,浅部 10km 左右库仑应力变化为正,这与余震在北川—映秀段 10 km 左右深度的集中分布

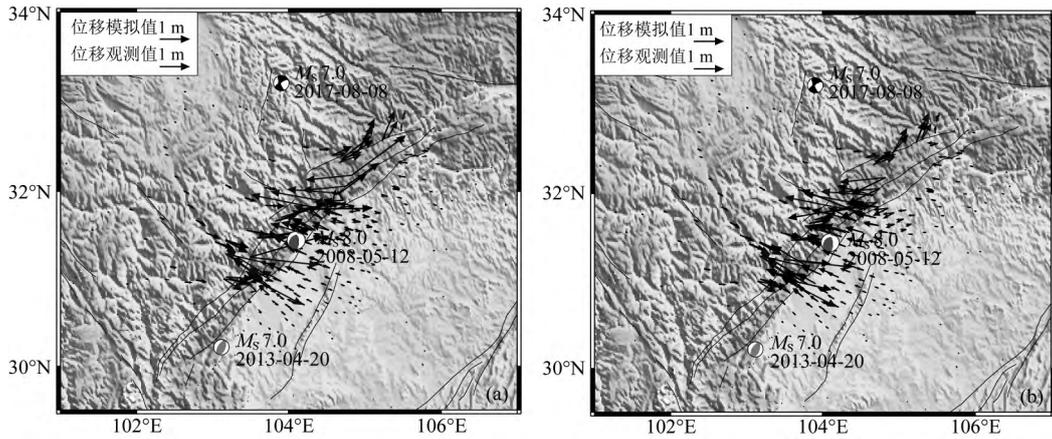


图3 汶川地震同震位移观测值和计算值

(a) Ji 和 Hayes(2008)模型; (b) Fielding 等(2013)模型.

Fig. 3 Observed and modeled coseismic displacements caused by Wenchuan earthquake

(a) Ji and Hayes (2008) model; (b) Fielding et al (2013) model.

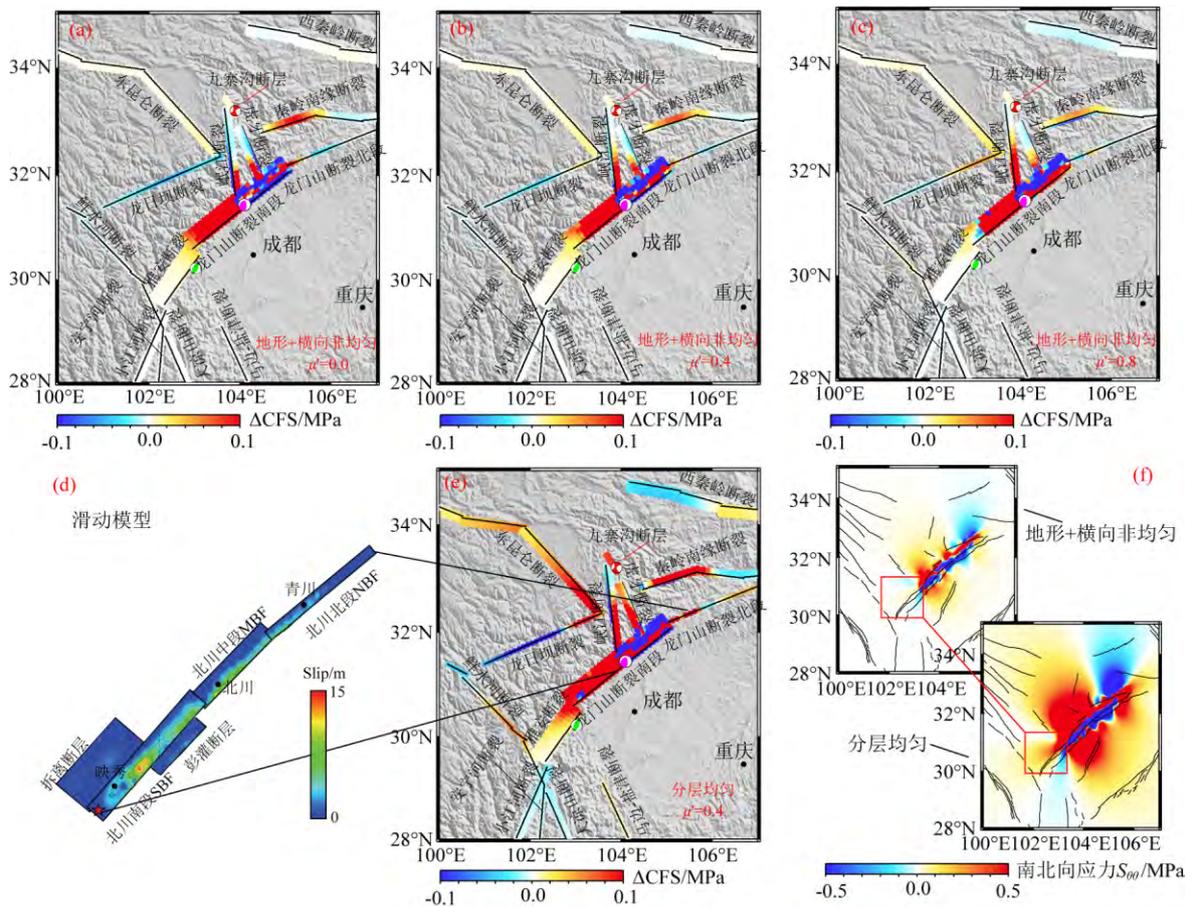


图4 汶川地震引起的断层同震库仑应力变化

图(a)一(c)结果考虑地形和介质横向非均匀,视摩擦系数分别为0、0.4和0.8;(d)计算所使用滑动模型;(e)不考虑地形和介质非均匀,视摩擦系数为0.4;(f)考虑地形和介质非均匀性与否的南北向应力 S_{00} ; (a)一(c)和图(e)中黑线为断层出露地表线;断层计算深度范围为0~30 km,断层越接近直立则断层投影宽度越窄;红色、绿色、粉色震源球依次代表九寨沟、芦山、汶川地震。

Fig. 4 Coseismic Coulomb stress changes on faults caused by Wenchuan earthquake

(a), (b) and (c) ΔCFS (heterogeneous model) calculated assuming $\mu' = 0.0, 0.4,$ and $0.8,$ respectively; (d) Slip model; (e) ΔCFS (homogeneous model) calculated assuming $\mu' = 0.4$; (f) North-south stress S_{00} . In (a)一(c) and (e), black lines denote surface parts of faults. Calculating depths range 0 to 30 km. Red, purple and green beach balls represent 2017 Jiuzhaigou, 2008 Wenchuan and 2013 Lushan earthquakes, respectively.

较好对应. 龙门山断裂的未破裂区即映秀以南和青川以北区域库仑应力为正值, 这与前人结果相符 (Parsons et al., 2008; Wan and Shen, 2010). 同时, 计算结果显示汶川地震的发生使得雅安断裂的库仑应力变化约为 0.01 MPa, 这与 Parsons 等(2008)的结果一致. 2013 年芦山地震的发生一定程度上也印证了本文对汶川地震引起周边断层库仑应力变化的计算结果的正确性. 当采取不同视摩擦系数来计算不同断层面上库仑应力变化时, 计算结果并无明显改变, 只是随着视摩擦系数增加, 岷江断裂和鲜水河断裂北段的正值区增大, 西秦岭断裂的库仑应力正值区减小. 另外, 计算结果显示汶川地震对九寨沟地震发震断层上的同震库仑应力均为正值, 约为 0.008 MPa, 表明汶川地震的发生增加了此次九寨沟地震发生的危险性. 要进一步讨论汶川地震震后九年时间, 其对九寨沟地震发震断层库仑应力加载的时间演化规律, 需考虑震后黏弹性松弛效应.

2.2 2008 年汶川地震震后库仑应力变化

在汶川地震震后应力演化计算中, 上地壳为弹性体, 中下地壳和上地幔为黏弹性 Maxwell 体. 模型中地壳结构参考柳畅等(2012)研究结果, 弹性参数数据 Crust1.0 模型取值. 黏滞系数作为震后形变计算关键参数, 模拟中将中地壳黏滞系数近似视为中地壳和低速层的综合黏弹性效应, 黏滞系数试算过程类同于 Shao 等(2011)采用的格点搜索法的粗粒度版本, 并且分别以柳畅等(2012)采用的黏度结构和 Shao 等(2011)拟合的黏度结构为上下界. 前者是长时间地质变形对应等效黏滞系数, 后者是震后短期 1 年内反演的黏滞系数, 这样的上下界约束能保证黏滞系数的合理性. 经过试算, 本文所采用的流变参数示于表 2. 图 5 显示采用上述参数计算所得汶川地震震后位移, 九寨沟地震处震后位移约为 3 cm, 与观测较为接近, 也进一步验证了计算的可靠性.

表 2 流变参数

Table 2 Parameters of visco-elastic crust and upper mantle

	川西高原		四川盆地	
	深度/km	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	深度/km	$\eta/(\text{Pa} \cdot \text{s})$
上地壳	0~22	/	0~17	/
中地壳	22~42	4×10^{18}	17~37	1×10^{21}
下地壳	42~62	2×10^{18}	37~50	8×10^{20}
地幔	>62	1×10^{20}	>50	1×10^{20}

图 6 给出了芦山地震和九寨沟地震震源附近库仑应力变化随时间的演化关系. 汶川地震对芦山地

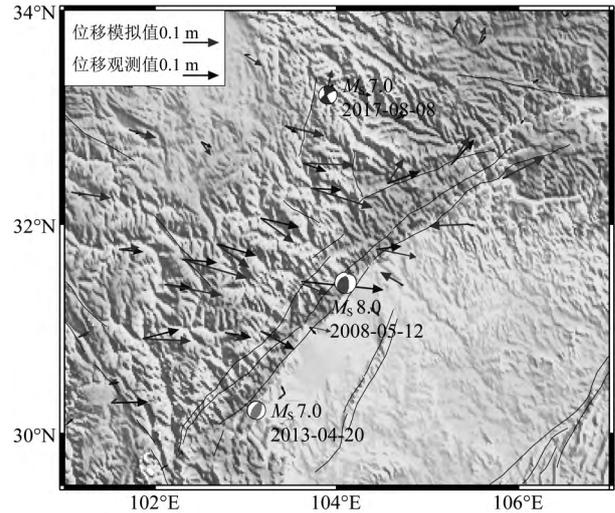


图 5 汶川地震震后九年位移观测值与计算值

Fig. 5 Observed and modeled displacements 9 years after the 2008 Wenchuan earthquake

震的同震、震后库仑应力加载均为正值, 随时间推移, 震后库仑应力增加, 且视摩擦系数越高, 震后库仑应力增加越缓慢. Nalbant 和 McCloskey (2010) 的计算结果显示汶川地震对芦山地震持续加载, 同震库仑应力变化约 0.014 MPa, 5 年的黏弹性库仑应力变化值约为 0.003 MPa. 在 Nalbant 和 McCloskey (2010) 的计算中, 中下地壳黏滞系数为 $4 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和本文黏滞系数取值为相同数量级, 视摩擦系数为 0.7, 震后 5 年应力变化量和本文图 6a 视摩擦系数取为 0.8 的结果接近, 一定程度上说明我们选取参数的合理性.

汶川地震对于九寨沟 $M_s 7.0$ 地震发震断层造成的同震库仑应力变化约为 0.008 MPa, 震后库仑应力随不同视摩擦系数增长幅度不一. 由于九寨沟地震震源机制反映了其走滑特性, 据 Parsons 等(1999)的研究, 其视摩擦系数取为 0~0.4 的震后库仑应力变化更为合理, 计算得到的范围为 0.012~0.016 MPa. 根据 Aki(1966) 推导的倾滑断层应力降公式, 可得到应力降与滑动速率的估算关系, 对时间微分则得到应力积累率的估算公式为

$$\Delta \dot{\sigma} = \frac{4(\lambda + \mu)}{\pi(\lambda + 2\mu)} \mu \left(\frac{V}{W} \right), \quad (11)$$

式中, λ 和 μ 为拉梅常数, 取值参考 Crust 1.0 模型. V 为滑动速率, 取值参考虎牙断裂的走滑速率 $1.4 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (杨晓平和邓忠文, 1999). 若断层宽度取为 20 km, 则九寨沟地震处年应力积累率约为 $0.002 \text{ MPa} \cdot \text{a}^{-1}$. 据此, 当视摩擦系数取值为 0~0.4 时, 汶川地震对九寨沟地震的黏弹性应力加载超过

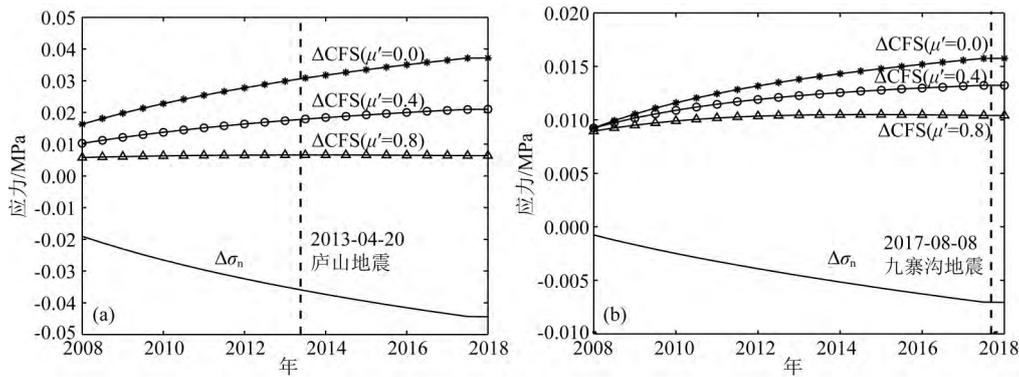


图 6 汶川地震震后在芦山地震(a)和九寨沟地震(b)处库仑应力、剪应力和正应力随时间变化

Fig. 6 Temporal change of ΔCFS at the hypocenters of the 2013 Lushan earthquake (a) and 2017 Jiuzhaigou earthquake (b)

库仑应力触发阈值,并且作为一阶估算,九寨沟地震处 $0.012 \sim 0.016$ MPa 的库仑应力变化除以年应力积累速率 $0.002 \text{ MPa} \cdot \text{a}^{-1}$,可大致推出汶川地震的应力加载使九寨沟地震约提前 6~8 年发生。图 6 所示现象表明地震间相互作用性质可能变化,如本文结果表明随着时间增加,汶川地震对九寨沟地震的库仑应力值增强区逐渐扩大,类似结果也在玛尼地震(程佳等,2011)和 Landers 地震中出现(Zeng, 2001)。

2.3 汶川地震、芦山地震和九寨沟地震对周边断层的影响

2.3.1 九寨沟地震对余震分布的影响

根据九寨沟地震静态滑动分布模型,我们计算了九寨沟地震导致的同震静态库仑应力变化。图 7 给出了 15 km 深度处的库仑应力变化计算结果。计算中考虑区域背景应力场的影响(石耀霖和曹建玲,2010),有效摩擦系数取中间值 0.4,得到最优破裂面上的库仑应力变化。结果显示主震破裂面附近以及破裂面的西北、东南端为库仑应力正值区,经统计约 54% 余震位于库仑应力变化大于 0.01 MPa 区域。破裂面西北、东南两端的应力正值区域内还没有余震记录,如果余震定位足够精确,库仑应力触发阈值区余震缺失可能是这些区域应力仍未释放,处于闭锁状态。同时,我们还计算了不同有效摩擦系数的库仑应力变化,总体样式无明显改变,只在细节略有不同。此外,尝试在计算中考虑汶川地震的同震和震后影响及不同视摩擦系数的影响,结果显示这些因素的考虑对九寨沟地震余震分布和库仑应力增强区的对应关系并无明显改善。类似的工作,缪森和朱守彪(2013)的计算结果表明芦山地震的余震受芦山、汶川地震共同作用,而据单斌等(2013)库仑应力变化和余震精定位的对应关系,芦山地震单独作用足

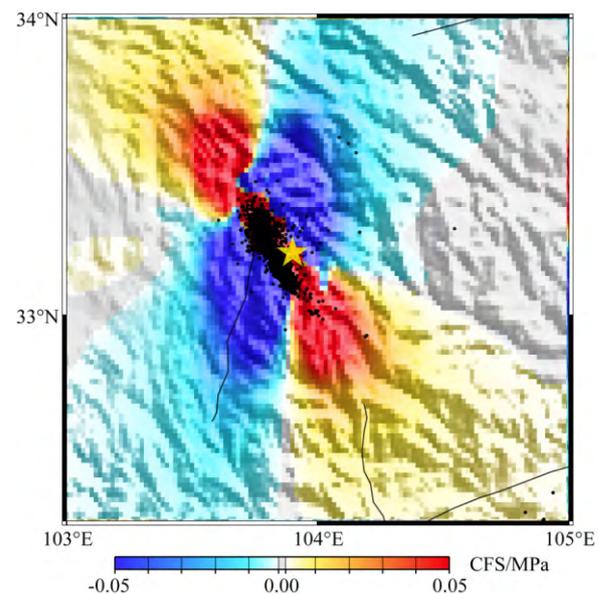


图 7 九寨沟地震引起的同震库仑应力变化与余震 ($M \geq 1$) 分布

1 级以上余震截至至 2017 年 8 月 22 日,数据来源 <http://10.2.14.222/catalog/2017-08-22CENC-M1.dat>;地形数据来源于 Etopol;黄色五角星为九寨沟地震震中位置。

Fig. 7 The ΔCFS induced by the Jiuzhaigou earthquake and spatial distribution of aftershocks ($M \geq 1$)

Yellowstar represents 2017 Jiuzhaigou earthquake; 14-days aftershocks data are from <http://10.2.14.222/catalog/2017-08-22CENC-M1.dat>.

以解释余震分布,二者使用的震源模型、背景应力场、余震数据差异可能导致了计算结果和结论的差异。对于九寨沟地震,申文豪等(2019)采用与本文不同的滑动模型,利用 InSAR 和 GPS 联合反演的九寨沟地震滑动模型计算库仑应力变化,发现有 83.6% 的余震位于库仑应力增加的区域。

2.3.2 三个地震对周围断层库仑应力变化的影响

汶川地震 8 级地震发生距九寨沟发震时刻已有 9 年,震后黏弹松弛效应使断层应力状态随时间改

变,芦山地震引起的应力扰动同样受震后黏弹松弛影响.同时,九寨沟地震造成的同震静态应力场变化也会影响周边断层的应力积累.考虑汶川、芦山地震同震应力和震后黏弹应力调整以及九寨沟地震同震应力降,我们取视摩擦系数 0.4,计算了汶川地震、芦山地震和九寨沟地震造成的周边断层应力积累,示于图 8.为明确不同震级地震影响范围的差异,在图 8c 中比较了汶川地震引起的应力变化(同震+震后,时间点为九寨沟地震发震时刻)和三个地震引起的应力变化(同震+震后,时间点同上),芦山地震和九寨沟地震影响范围(图 8c 红框)有限且集中于震中附近,汶川地震的同震和震后效应在应力演化中占主导作用,芦山地震、九寨沟地震仅在震中附近影响占优.比较图 8b 和图 4b,汶川地震引起的震后应力演化主要改变了龙门山断裂南段的库仑应力,使其库仑应力负值区向南扩展,同时使龙门山断裂北段(青川段)库仑应力增大. Pollitz(1992)的研究表明,同震应变和震后黏弹应变二者的大小关系取决于与断层距离、时间尺度等因素,但一般而言在几倍于弹性厚度的远场和几倍于黏弹特征时间的尺度里,震后应变可能大于同震应变.由于时间尺度较小,所以断层面上显示的震后应力变化不大,前文图 6 也显示了同样的结论.在芦山地震震中附近,芦山地震的影响占优(图 8a),雅安断裂的东北断库仑应力变化为负,但其南段库仑应力变化仍为正.九寨沟断层南段库仑应力为负,北段库仑应力为正,约为 0.02 MPa,附近的秦岭南缘西端库仑应力达到 -0.1 MPa.

研究区内三次地震的同震应力扰动和震后应力调整共同决定了断层面上的库仑应力:九寨沟发震

断层南段和雅安断裂北段,秦岭南缘断裂库仑应力卸载大于 -0.1 MPa;西秦岭断裂、龙日坝断裂西段、秦岭南缘断裂西段应力卸载约为 -0.01 MPa.雅安断裂南段、龙门山断裂映秀以南段受到大于 0.1 MPa 的应力加载,东昆仑断裂、龙日坝断裂东段、岷江断裂北段、鲜水河康定段均受到大于 0.01 MPa 的应力加载,地震危险性增加.

3 讨论

大陆内部的构造块体运动是上、中下地壳共同作用、相互作用的结果,黏弹性中下地壳在应力积累/释放循环中发挥重要作用.通过中下地壳黏弹松弛调整,震后形变可在较长时间内影响更远区域,加速或延缓周边断层的应力积累.震源模型、地壳结构和流变结构影响地震间的黏弹性应力触发计算,计算需要采用合适的模型和方法.本文通过选择适当的震源模型,采用考虑地形、弹性和黏弹参数横向非均匀的椭球形地球模型,保证计算结果合理性.

3.1 黏滞系数和震后形变机制

许多学者讨论了青藏高原黏滞系数(Royden, 1996; Clark and Royden, 2000; Beaumont et al., 2001; Shen et al., 2003),使用不同资料、方法得到的黏滞系数差异达到数个量级.高温高压下,岩石应力-应变率关系表现出非线性,震后短期应变率通常比长期孕震过程中的应变率高很多,因此,震后形变和长时间地质变形研究之间的黏滞度存在差异(张晁军等, 2008).中下地壳为 Maxwell 体的模型,最初阶段应变率大,对应等效黏滞系数较低.经历了开始阶段应变率迅速衰减后,应变速率变小且趋向

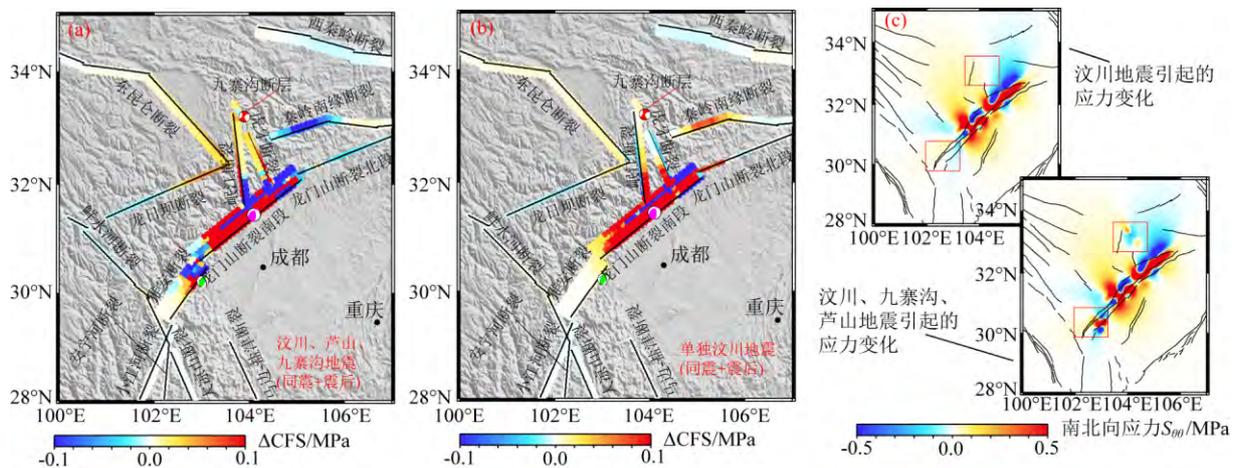


图 8 汶川地震、芦山地震和九寨沟地震引起的周围断层库仑应力变化

Fig. 8 ΔCFS on faults caused by Wenchuan, Lushan and Jiuzhaigou earthquakes

稳定,等效黏滞系数较高.例如:张晁军等(2008)采用 2001 年昆仑山口西地震震后 1 年 GPS 数据和炉霍地震震后 7 年的跨断层形变数据拟合的下地壳黏滞系数分别为 $10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级. Shao 等(2011)和 Huang 等(2014)分别采用震后 14 天和 2 年的形变数据拟合的川西高原的下地壳黏滞系数为 $10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 量级和 $4.4 \times 10^{17} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. 本文黏滞系数与上述研究具有一个量级差异,这是因为我们采用了震后较长时间(9 年)GPS 数据,应变率较小.此外,本文采用的震后形变资料受限,下一步如果能获取 2008 年以来震后形变连续观测资料,对于中下地壳黏滞系数能起到更好约束.

值得注意的是,除了黏弹性松弛作用,孔隙弹性回跳(Peltzer et al., 1996, 1998)和震后余滑(Marone et al., 1991; Shen et al., 1994; Hsu et al., 2002)也是可能的震后形变解释.据前人研究(Ozawa et al., 2011; Shao et al., 2011),震后余滑量较大区域常位于同震破裂延伸区.根据 Shao 等(2011)利用 2008 年汶川地震震后形变数据反演得到的余滑模型,除汉王断层外其余子断层的滑动分布可视为汶川同震滑动在深度方向上的延伸.因此,如果汶川地震的震后形变完全由余滑引起,作为一级近似,此时汶川地震对九寨沟地震的震后库仑应力样式应该和同震库仑应力类似,库仑应力为正,同样有利于九寨沟地震的发生.此外,根据 Huang 等(2014)对汶川地震震后形变机制的讨论,余滑难以解释汶川地震远场形变,可推测九寨沟地震震源附近的震后形变主要受黏弹性松弛控制.在更深入的研究中,应定量评估震后黏弹性松弛和余滑所占比例,例如:朱守彪和蔡永恩(2009)对利用二维有限元模型对台湾集集地震做了细致工作,但相比二维模型,三维模型计算量急剧增加,如何在更接近真实地球的三维模型里进行此类讨论,需更多研究.

3.2 震间应力积累

在强震触发研究中,不能忽视地震断层的应力积累与释放历史.震间弹性应变能积累与地震释放间的平衡关系反映了断层的应变能盈余或亏损程度,通过地震矩平衡研究有助于认识地震断层的中长期危险性(Wang et al., 2010, 2011a).根据 Wang 等(2010)给出的松潘—甘孜地区地震矩平衡结果,2017 年九寨沟地震发生前,该地震滑动破裂区存在着地震矩释放的亏空区. Wang 等(2010)采用的地震目录选自 1879 年以来的 6 级以上地震,可近似认为在百年来九寨沟地震所处断层应力积累大于应

力释放的背景下,汶川地震对九寨沟地震的黏弹应力加载加速了九寨沟地震发生.

本文对震间的断裂应力积累速率估计较简单,例如庞亚瑾等(2017)以实际 GPS 速度观测资料为约束构建三维有限元模型估计的九寨沟地震震源断裂库仑应力积累速率约 $0.0012 \text{ MPa} \cdot \text{a}^{-1}$,在此情况下的九寨沟地震约提前发生 10~13 年,值得注意的是地震提前发生年限估算还受震源模型、介质非均匀性、断层闭锁情况等的影响,应清醒的认识到本文的这种估算具有很多不确定性,但不失为一种初步的尝试.

本研究仅从同震和震后库仑应力变化积累的角度来估计断层面上地震的加速或延迟发生,并未考虑地震发生过程中的一些非线性影响,例如,速率-状态相关的摩擦本构(Dieterich and Kilgore, 1994)可能导致的破裂加速.断层强度的非均匀分布等因素也暂时未能考虑,对断层面障碍体和摩擦系数状态的了解也很有限.

3.3 与前人工作相比的改进和差异

本文计算与前人相比(Parsons et al., 2008; Toda et al., 2008; 单斌等, 2009; Wan and Shen, 2010; Nalbant and McCloskey, 2011; 程佳等, 2018),使用了不同的震源模型,计算方法也有所不同,我们方法的主要改进是考虑了地表地形、地球曲率、弹性和黏弹性参数的横向非均匀性.图 4b 和图 4e 的差别反映了地表地形和介质非均匀性对同震库仑应力变化的影响,尽管各断层库仑应力样式相近,但库仑应力量值相差近一个量级.由图 4f 可知考虑地形三维横向非均匀地球模型和不考虑地形的分层球对称模型所得同震应力降(以南北分量 $S_{\theta\theta}$ 为例)样式上基本一致,但在龙门山断裂的西南端(图 4f 红色矩形框处)应力有较大不同,导致了两个模型在龙门山断裂南段紧邻雅安断裂处出现了库仑应力差别,局部出现了正负差别.此外,非均匀模型和球对称分层模型得到的虎牙断裂库仑应力样式也不同,前者虎牙断裂南段为正北段为负,后者整条虎牙断裂库仑应力均为正值.综上,介质非均匀性和地形的综合效应对库仑应力量值的影响较大.在库仑应力样式上,对远场断层应力样式影响较小,但对地震破裂面附近的断层库仑应力样式影响较大,甚至可能出现正负相反.类似的工作,瞿武林等(2017)计算 2004 年苏门答腊 M_w 9.3 地震时发现由分层球对称和三维横向非均匀地球两种模型分别计算得到断层库仑应力样式大致相近,但在距离破裂面较近的西安达曼断层

南段有较大差异.除了弹性参数,介质参数的差异还包括不同作者黏滞系数选择上的差异,Nalbant 和 McCloskey (2011)计算得到汶川地震同震库仑应力变化约 0.014 MPa,5 年的黏弹性库仑应力变化值约为 0.003 MPa,他们的中下地壳黏滞系数为 $4 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和本文黏滞系数取值为相同数量级但数值略有差异.

除了介质参数,地震产生的库仑应力变化还强烈依赖于震源破裂模型,比较不同作者结果,距离汶川地震震中较远的断层库仑应力变化比较接近,不同作者的库仑应力差异集中在距离震中较近断层.例如:我们的计算值与单斌等(2009)、Wan 和 Shen (2010)相比,在距离震中较远的鲜水河断裂、东库仑断裂、西秦岭断裂上库仑应力较为接近.Parsons 等(2008)的断层和我们的断层不尽相同,但在鲜水河断裂、昆仑断裂、雅安断裂的库仑应力与我们比较一致,在岷江断裂全为负值与本文正负交替的结果略有差别.由于断层破裂区的复杂性,单斌等(2009)、Wan 和 Shen(2010)均未给出汶川断裂主破裂区的库仑应力变化,但我们的结果和他们的共同之处是紧邻汶川断裂主破裂区的龙门山断裂映秀段和青川段库仑应力变化均为正值,且超过 0.1 MPa.在龙日坝断裂,我们的计算显示由东至西该断层库仑应力从负值变为正,而单斌等(2009)结果显示龙日坝断裂库仑应力均为正值,Wan 和 Shen(2010)结果则显示龙日坝断裂库仑应力均为负值.Toda 等(2008)采用由波形拟合反演的震源模型,Toda 等(2008)计算结果只显示了龙门山断裂、鲜水河断裂和岷江断裂,与本文结果相比,前两条断裂结果类似,即龙门山主破裂区库仑应力变化主要为负值,与其紧邻的映秀和青川段库仑应力变化均为正,但鲜水河断裂与本文结果存在差异,即康定到道孚段库仑应力为正,道孚以北为负.

我们在计算方法和断层滑动模型的选择上均与前人工作均有所区别,然而不同作者的计算结果往往反映不同滑动模型、介质参数、接收断层滑动习性、计算方法的共同效应,因此很难完全厘清某一因素单独效应,未来应进行更细致的不确定性分析,并尽可能选用准确的滑动模型和接近真实的介质参数.本研究中的介质横向非均匀强烈依赖于地壳模型和地幔模型,由于资料的限制,目前我们难以定量计算三维速度结构误差造成的影响,但通过比较三维非均匀模型和球对称分层模型的差异,有助于我们在思考这个问题时得到一定的启示.

本文的意义在于基于地震的应力触发理论,考虑了地表地形、地球椭率曲率和介质非均匀,利用更接近真实地质条件的计算模型,给出了汶川地震、芦山地震和九寨沟地震同震、震后效应对各断层破裂的加速或延迟作用.

4 结论

本文采用含地形横向非均匀椭圆形黏弹地球位错模型,计算了汶川地震引起的同震应力降和震后黏弹性松弛应力场变化,分析了汶川地震对九寨沟的应力加载关系以及汶川地震、芦山地震和九寨沟地震对周边主要活动断层的影响,得到以下主要结论:

(1)龙门山以西的川西高原中、下地壳黏滞系数分别为 $4 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $2 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,四川盆地中、下地壳黏滞系数分别为 $1 \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 和 $8 \times 10^{20} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 能够很好地拟合汶川地震震后 9 年的 GPS 观测.

(2)汶川地震引起的九寨沟地震断层处同震库仑应力约为 0.008 MPa,考虑震后黏弹性松弛效应,汶川地震对九寨沟地震的黏弹性应力加载约为 0.012~0.016 MPa,超过库仑应力触发阈值,有助于九寨沟地震提前发生.

(3)九寨沟地震静态库仑应力变化和余震分布的对应关系为约 54% 余震落在库仑应力变化大于 0.01 MPa 的区域.考虑汶川地震和芦山地震震后黏弹松弛效应及九寨沟地震的影响,九寨沟发震断层南段、雅安断裂北段和秦岭南缘断裂库仑应力卸载大于 -0.1 MPa;西秦岭断裂、龙日坝断裂西段、秦岭南缘断裂西段应力卸载约为 -0.01 MPa;雅安断裂南段、龙门山断裂映秀以南段库仑应力加载约 0.1 MPa;东昆仑断裂、龙日坝断裂东段、岷江断裂北段、鲜水河康定段均受到大于 0.01 MPa 的应力加载,地震危险性增加.

References

- Aki K. 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, 2, Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from G-wave spectrum. *Bull. Earthquake Res. Inst., Tokyo Univ.*, 44:73-88.
- Amante C, Eakins B W. 2009. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis. Washington: National Geophysical Data Center Publish.
- Amante C, Eakins B W. 2009. ETOPO1 1 arc-minute global relief model: Procedures, data sources and analysis, NOAA Tech.

- Memo. NESDIS NGDC-24, 19 pp
- Antonioli A, Piersanti A, Spada G. 1998. Stress diffusion following largestrike-slip earthquakes: A comparison between spherical and flat-earth models. *Geophysical Journal International*, 133(1): 85-90.
- Beaumont C, Jamieson R A, Nguyen M H, et al. 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414(6865): 738-742.
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, et al. 2013. A brief talk on the 20 April 2013 Lushan M_W 6.7 earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(3): 285-295.
- Cheng H H, Zhang B, Zhang H, et al. 2017. Calculation of the coseismic deformation and stress changes of the Kaikoura M_W 7.8 earthquake, Nov 13, 2016. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(7): 2641-2651, doi: 10.6038/cjg20170712.
- Cheng J, Liu J, Gan W J, et al. 2011. Coulomb stress interaction among strong earthquakes around the Bayan Har block since the Manyi earthquake in 1997. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(8): 1997-2010, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.08.007.
- Cheng J, Yao S H, Liu J, et al. 2018. Viscoelastic Coulomb stress of historical earthquakes on the 2017 Jiuzhaigou earthquake and the subsequent influence on the seismic hazards of adjacent faults. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 61(5): 2133-2151, doi: 10.6038/cjg2018L0609.
- Chinnery M A. 1961. The deformation of the ground around surface faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 51(3): 355-372.
- Chinnery M A. 1963. The stress changes that accompany strike-slip faulting. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 53(5): 921-932.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow. *Geology*, 28(8): 703-706.
- Dieterich J H, Kilgore B D. 1994. Direct observation of frictional contacts: New insights for state-dependent properties. *Pure and Applied Geophysics*, 143(1-3): 283-302.
- Dong J, Sun W K, Zhou X, et al. 2014. Effects of Earth's layered structure, gravity and curvature on coseismic deformation. *Geophysical Journal International*, 199(3): 1442-1451.
- Fielding E J, Sladen A, Li Z H, et al. 2013. Kinematic fault slip evolution source models of the 2008 $M_7.9$ Wenchuan earthquake in China from SAR interferometry, GPS and teleseismic analysis and implications for Longmen Shan Tectonics. *Geophysical Journal International*, 194(2): 1138-1166, doi: 10.1093/gji/ggt155.
- Fu G Y, Sun W K. 2008. Surface coseismic gravity changes caused by dislocations in a 3-D heterogeneous earth. *Geophysical Journal International*, 172(2): 479-503.
- Fu G Y, Sun W K, Fukuda Y, et al. 2010. Coseismic displacements caused by point dislocations in a three-dimensional heterogeneous, spherical earth model. *Geophysical Journal International*, 183(2): 706-726.
- Harris R A. 1998. Introduction to special section: Stress triggers, stress shadows, and implications for seismic hazard. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B10): 24347-24358.
- Hsu Y J, Bechor N, Segall P, et al. 2002. Rapid afterslip following the 1999 Chi-Chi, Taiwan earthquake. *Geophysical Research Letters*, 29(16): 1-4, doi:10.1029/2002GL014967.
- Huang M H, Bürgmann R, Freed A M. 2014. Probing the lithospheric rheology across the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 396: 88-96.
- Ji C, Hayes G. 2008. Preliminary Result of the May 12, 2008 M_W 7.9 Eastern Sichuan, China earthquake. http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php. Last accessed July 10, 2013.
- Ji L Y, Liu C J, Xu J, et al. 2017. InSAR observation and inversion of the seismogenic fault for the 2017 Jiuzhaigou M_S 7.0 earthquake in China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4069-4082, doi: 10.6038/cjg20171032.
- Jia Q P, Jia D, Zhu A L, et al. 2007. Active tectonics in the Longmen thrust belt to the eastern Qinghai-Tibetan plateau and Sichuan basin; Evidence from topography and seismicity. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 42(1): 31-44.
- Laske G, Masters G, Ma Z T, et al. 2013. Update on CRUST1.0: A 1-degree global model of Earth's crust. //Proceedings of EGU General Assembly Conference Abstracts. *Vienna, Austria*, 15: 2658.
- Li C Y, Song F M, Ran Y K. 2004. Late Quaternary activity and age constraint of the northern Longmenshan Fault zone. *Seismology and Geology* (in Chinese), 26(2): 248-258.
- Lin X G, Sun W K, Zhang H, et al. 2013. A feasibility study of an FEM simulation used in co-seismic deformations: A case study of a dip-slip fault. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 24(4): 637-647.
- Liu C, Zhu B J, Shi Y L. 2012. Stress accumulation of the Longmenshan fault and recurrence interval of Wenchuan earthquake based on viscoelasticity simulation. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 86(1): 157-169.
- Marone C J, Scholtz C H, Bilham R. 1991. On the mechanics of earthquake afterslip. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B5): 8441-8452.
- Miao M, Zhu S B. 2013. The static Coulomb stress change of the 2013 Lushan M_S 7.0 earthquake and its impact on the spatial distribution of aftershocks. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 35(5): 619-631.
- Mitrovica J X, Forte A M. 2004. A new inference of mantle viscosity based upon joint inversion of convection and glacial isostatic adjustment data. *Earth and Planetary Science Letters*, 225(1-2): 177-189.
- Nalbant S S, McCloskey J. 2011. Stress evolution before and after the 2008 Wenchuan, China earthquake. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1-2): 222-232.
- Nostro C, Piersanti A, Antonioli A, et al. 1999. Spherical versus flat models of coseismic and postseismic deformations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B6): 13115-13134.
- Nostro C, Piersanti A, Cocco M. 2001. Normal fault interaction caused by coseismic and postseismic stress changes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B9): 19391-19410.
- Okada Y. 1985. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*,

- 75(4): 1135-1154.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2): 1018-1040.
- Okubo S. 1992. Gravity and potential changes due to shear and tensile faults in half-space. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 97(B5): 7137-7144.
- Ozawa S, Nishimura T, Suito H, et al. 2011. Coseismic and postseismic slip of the 2011 magnitude-9 Tohoku-Oki earthquake. *Nature*, 475(7356): 373-376.
- Pang Y J, Cheng H H, Zhang H, et al. 2017. Numerical modeling of crustal deformation in the eastern margin of the Bayan Har block and analysis of seismogenic environment of the 2017 Jiuzhaigou earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4046-4055, doi: 10.6038/cjg20171030.
- 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.
- Parsons T, Stein R S, Simpson R W, et al. 1999. Stress sensitivity of fault seismicity: a comparison between limited-offset oblique and major strike-slip faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 104(B9): 20183-20202.
- Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al. 1996. Postseismic rebound in fault step-overs caused by pore fluid flow. *Science*, 273(5279): 1202-1204.
- Peltzer G, Rosen P, Rogez F, et al. 1998. Poroelastic rebound along the Landers 1992 earthquake surface rupture. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103(B12): 30131-30145.
- Pollitz F F. 1992. Postseismic relaxation theory on the spherical earth. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(1): 422-453.
- Qu W L, Zhang B, Huang L Y, et al. 2017. Coulomb stresses induced by the 2004 M_w 9.3 Sumatra earthquake. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences* (in Chinese), 34(1): 86-98.
- Qu W L, Zhang B, Shi Y L, et al. 2015. Equivalent body force finite elements method and 3-D earth model applied in 2004 Sumatra earthquake. // AGU Fall Meeting Abstracts. San Francisco, America.
- Royden L. 1996. Coupling and decoupling of crust and mantle in convergent orogens: Implications for strain partitioning in the crust. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B8): 17679-17705.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2009. Stress changes on major faults caused by M_w 7.9 Wenchuan earthquake, May 12, 2008. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(5): 593-601.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, et al. 2013. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake. *Science China Earth Sciences*, 56(7): 1169-1173.
- Shen W H, Li Y S, Jiao Q S, et al. 2019. Joint inversion of strong motion and InSAR/GPS data for fault slip distribution of the Jiuzhaigou 7.0 earthquake and its application in seismology. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(1): 115-129.
- Shao Z G, Fu R S, Xue T X, et al. 2008. The numerical simulation and discussion on mechanism of postseismic deformation after Kunlun M_s 8.1 earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2008, 51(3): 805-816.
- Shao Z G, Wang R J, Wu Y Q, et al. 2011. Rapid afterslip and short-term viscoelastic relaxation following the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake? *Earthquake Science*, 24(2): 163-175.
- Shen Z K, Jackson D D, Feng Y J, et al. 1994. Postseismic deformation following the Landers earthquake, California, 28 June 1992. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(3): 780-791.
- Shen Z K, Wan Y G, Gan W J, et al. 2003. Viscoelastic triggering among large earthquakes along the East Kunlun fault system. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 46(6): 786-795.
- Shen Z K, Zeng Y, Wang M, et al. 2003. Postseismic deformation modeling of the 2001 Kokoxili earthquake, western China. // *Geophysical Research Abstracts*, 5: 07840.
- Shi Y L, Cao J L. 2008. Effective viscosity of China continental lithosphere. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2008, 15(3): 83-95.
- Shi Y L, Cao J L. 2010. Some aspects in static stress change calculation—Case study on Wenchuan earthquake. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(1): 102-110, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.011.
- Simmons N A, Forte A M, Boschi L, et al. 2010. GyPSuM: A joint tomographic model of mantle density and seismic wave speeds. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115(B12): B12310, doi: 10.1029/2010JB007631.
- Steketee J A. 1958. On Volterra's dislocations in a semi-infinite elastic medium. *Canadian Journal of Physics*, 36(2): 192-205.
- Sun W K, Okubo S. 2002. Effects of earth's spherical curvature and radial heterogeneity in dislocation studies—for a point dislocation. *Geophysical Research Letters*, 29(12): 46-1-46-4.
- 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): L17305, doi: 10.1029/2008GL034903.
- Wan Y G, Shen Z K. 2010. Static Coulomb stress changes on faults caused by the 2008 M_w 7.9 Wenchuan, China earthquake. *Tectonophysics*, 491(1-4): 105-118.
- Wang H, Liu M, Cao J L, et al. 2011a. Slip rates and seismic moment deficits on major active faults in mainland China. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2): B02405, doi: 10.1029/2010JB007821.
- Wang H, Liu M, Shen X H, et al. 2010. Balance of seismic moment in the Songpan-Ganzê region, eastern Tibet: Implications for the 2008 Great Wenchuan earthquake. *Tectonophysics*, 491(1-4): 154-164.
- Wang J J, Xu C J. 2009. Stress transfer between 1997 Manyi M_w 7.6 earthquake and 2001 Kokoxili M_w 7.8 earthquake. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 29(1): 11-14.
- Wang Q, Qiao X J, Lan Q G, et al. 2011b. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan. *Nature Geoscience*, 4(9): 634-640.
- Wang R J, Martín F, Roth F. 2003. Computation of deformation induced by earthquakes in a multi-layered elastic crust—FORTRAN programs EDGRN/EDCMP. *Computers & Geosciences*, 29(2):

195-207.

- Wang Y Z, Wang E N, Shen Z K, et al. 2008. GPS-constrained inversion of present-day slip rates along major faults of the Sichuan-Yunnan region, China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1267-1283.
- Xu X W, Wen X Z, Chen G H, et al. 2008. Discovery of the Longriba faultszone in eastern Bayan Har block, China and its tectonic implication. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 51(9): 1209-1223.
- Yang X P, Jiang P, Song F M, et al. 1999. The evidence of the south Longmenshan fault zones cutting late quaternary stratum. *Seismology and Geology* (in Chinese), 21(4): 341-345.
- Yi G X, Long F, Liang M J, et al. 2017. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the 8 August 2017 M 7.0 Jiuzhaigou earthquake and its aftershocks, northern Sichuan. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 60(10): 4083-4097, doi: 10.6038/cjg20171033.
- Zeng Y H. 2001. Viscoelastic stress-triggering of the 1999 Hector Mine Earthquake by the 1992 Landers Earthquake. *Geophysical Research Letters*, 28(15): 3007-3010.
- Zhang B, Zhang H, Shi Y L. 2015. Equivalent-bodyforce approach on modeling elastic dislocation problem using finite element method. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 58(5): 1666-1674, doi: 10.6038/cjg20150518.
- Zhang C J, Cao J L, Shi Y L. 2009. Studying the viscosity of lower crust of Qinghai-Tibet Plateau according to post-seismic deformation. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(3): 411-419.
- Zhu S B, Cai Y E. 2009. Dynamic mechanisms of the post-seismic deformation following large events: Case study of the 1999 Chi-Chi earthquake in Taiwan of China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 52(11): 1813-1824, doi: 10.1007/s11430-009-0144-6.
- 贾秋鹏, 贾东, 朱艾斓等. 2007. 青藏高原东缘龙门山冲断带与四川盆地的现今构造表现: 数字地形和地震活动证据. *地质科学*, 42(1): 31-44.
- 李传友, 宋方敏, 冉永康. 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.
- 柳畅, 朱伯靖, 石耀霖. 2012. 黏弹性数值模拟龙门山断裂带应力积累及大震复发周期. *地质学报*, 86(1): 157-169.
- 缪森, 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.
- 庞亚瑾, 程惠红, 张怀等. 2017. 巴颜喀拉块体东缘形变及九寨沟地震孕震环境数值分析. *地球物理学报*, 60(10): 4046-4055, doi: 10.6038/cjg20171030.
- 瞿武林, 张贝, 黄禄渊等. 2017. 2004 年 M_W 9.3 苏门答腊地震产生的库仑应力. *中国科学院大学学报*, 34(1): 86-98.
- 单斌, 熊熊, 郑勇等. 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: 地球科学*, 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.
- 申文豪, 李永生, 焦其松等. 2019. 联合强震记录和 InSAR/GPS 结果的四川九寨沟 7.0 级地震震源滑动分布反演及其地震学应用. *地球物理学报*, 62(1): 115-129.
- 邵志刚, 傅容珊, 薛霆隼等. 2008. 昆仑山 M_S 8.1 级地震震后变形场数值模拟与成因机理探讨. *地球物理学报*, 51(3): 805-816.
- 沈正康, 万永革, 甘卫军等. 2003. 东昆仑活动断裂带大地震之间的黏弹性应力触发研究. *地球物理学报*, 46(6): 786-795.
- 石耀霖, 曹建玲. 2008. 中国大陆岩石圈等效黏滞系数的计算和讨论. *地学前缘*, 15(3): 82-95.
- 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, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2010.01.011.
- 汪建军, 许才军. 2009. 玛尼 M_W 7.6 地震和可可西里 M_W 7.8 地震应力迁移研究. *大地测量与地球动力学*, 29(1): 11-14.
- 徐锡伟, 闻学泽, 陈桂华等. 2008. 巴颜喀拉地块东部龙日坝断裂带的发现及其大地构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(5): 529-542.
- 杨晓平, 邓忠文. 1999. 龙门山断裂带南段错断晚更新世以来地层的证据. *地震地质*, 21(4): 341-345.
- 易桂喜, 龙锋, 梁明剑等. 2017. 2017 年 8 月 8 日九寨沟 M 7.0 地震及余震震源机制解与发震构造分析. *地球物理学报*, 60(10): 4083-4097, doi: 10.6038/cjg20171033.
- 张贝, 张怀, 石耀霖. 2015. 有限元模拟弹性位错的等效体力方法. *地球物理学报*, 58(5): 1666-1674, doi: 10.6038/cjg20150518.
- 张晔军, 曹建玲, 石耀霖. 2008. 从震后形变探讨青藏高原下地壳黏滞系数. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38(10): 1250-1257.
- 朱守彪, 蔡永恩. 2009. 强震后地表变形的动力学机制研究——以 1999 年台湾集集地震为例. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 39(9): 1209-1219.

(本文编辑 张正峰)