

2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟

孟 秋^{1,2}, 高 宽³, 陈启志^{1,2}, 胡才博^{1,2}

MENG Qiu^{1,2}, GAO Kuan³, CHEN Qizhi^{1,2}, HU Caibo^{1,2}

1. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;

2. 中国科学院计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;

3. 山东省嘉祥县精锐工业有限公司, 山东 济宁 272400

1. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2. Key Laboratory of Computational Geodynamics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Shandong Jiaxiang Jingrui Industry Co., Ltd, Jining 272400, Shandong, China

MENG Q, GAO K, CHEN Q Z, et al., 2021. Seismogenic, coseismic and postseismic deformation and stress evolution of the 2008 Wenchuan earthquake: Numerical simulation analysis [J]. Journal of Geomechanics, 27 (4): 614-627. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.051

Abstract: The 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake occurred in the Longmenshan fault zone, which has complex geological background, strong surface relief, and heterogeneous elastic-viscous structures; however, the seismic risk of the Longmenshan fault zone was underestimated before the Wenchuan earthquake due to the low seismicity and slight surface tectonic deformation. We established an elastic-viscous finite element model from the perspective of numerical simulation, taking multiple factors into consideration, such as initial topography, gravity, tectonic loading, and viscoelastic relaxation of the middle and lower crusts and the upper mantle. The effects of the mentioned factors on the dynamic process of seismogenic and coseismic deformations of the 2008 Wenchuan earthquake as well as the postseismic deformation in 150 years were analyzed. We quantitatively studied the coseismic and postseismic deformations of the Yingxiu-Beichuan fault zone, and summarized the characteristics of stress accumulation, release, and adjustment in both the elastic and viscoelastic layers. The simulation results of the surface coseismic and postseismic displacements showed a good agreement with the geodetic data, and the aftershock distribution of the Wenchuan earthquake was explained in mechanics. The changes in preseismic, coseismic, and postseismic stress were calculated to analyze the dynamic cause of the Wenchuan earthquake and the influence on the seismic risk of surrounding areas.

Key words: Wenchuan earthquake; viscoelasticity; stress adjustment; postseismic deformation; finite element model

摘 要: 2008 年 M_s 8.0 级汶川大地震发生在具有复杂的地质构造背景、强烈的地表起伏、不均匀的弹性和黏性结构的龙门山断裂带上。由于震前地震活动性不够强烈且地表构造变形较小, 龙门山断裂带的地震危险性在汶川地震之前被低估。从数值模拟的角度, 建立黏弹性有限元模型, 考虑了初始地形、重力、构造加载、黏弹性松弛等因素对 2008 年汶川大地震的孕震、同震及震后 150 年变形全过程的影响, 定量

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42074117, 41474085)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42074117, 41474085)

第一作者简介: 孟秋 (1994—), 在读博士, 主要从事地球动力学数值模拟。E-mail: qmeng@whu.edu.cn

通讯作者: 胡才博 (1980—), 博士, 副教授, 主要从事地球动力学数值模拟。E-mail: hucb@ucas.ac.cn

收稿日期: 2020-11-30; **修回日期:** 2021-01-15; **责任编辑:** 范二平

引用格式: 孟秋, 高宽, 陈启志, 等, 2021. 2008 年汶川大地震孕震、同震及震后变形和应力演化全过程的数值模拟 [J]. 地质力学学报, 27 (4): 614-627. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.04.051

研究了映秀-北川断裂带的同震及震后变形,分析了弹性层、黏弹性层的应力积累、释放、调整的特点,模拟得到地表同震和震后位移与大地测量资料较为吻合,对汶川大地震的余震分布进行了力学上的解释,模拟得到震前、同震及震后的应力变化有助于深入分析大地震的动力学成因及其对周围区域的地震危险性影响。

关键词: 汶川大地震;黏弹性;应力调整;震后变形;有限元模型

中图分类号: P313.2; P313.4; P313.5 **文献标识码:** A

0 引言

北京时间2008年5月12日14时28分04秒, $M_w7.9$ 汶川大地震发生在青藏高原东缘和四川盆地交界处的龙门山断裂带之上(Burchfiel et al., 2008; 张勇等, 2008)。汶川大地震所在的龙门山断裂带两侧地表起伏较大,四川盆地和青藏高原海拔分别可达600 m和4000 m,这种强烈的地形差异既是长期构造变形的结果,同时也反映出该地区孕震的初始应力场的复杂性。Burchfiel et al. (2008)综合研究了2008年汶川大地震的地质构造背景、地震层析成像和地表变形特征。通过地质考察和综合分析,邓启东等(2011)对汶川大地震的震源破裂机制得到更进一步的认识,研究发现汶川地震震源断裂的同震破裂由龙门山构造带中央断裂的斜向滑动和前山断裂的纯逆冲滑动所组成。颜丹平等(2020)通过野外调查和构造解析,对青藏高原东缘龙门山逆冲带在中生代和新生代的两期生长过程进行了详细的地质学研究。

汶川大地震极震区是一个长椭圆,震害呈现明显的方向性,上盘震害明显高于下盘(李志强等, 2008; 吴健等, 2008),其地表破裂构造和运动性质均有分段特性,其中映秀-北川段以挤压逆冲为主,而北川-青川段则伴有较大的右旋走滑分量(董树文等, 2008; 李海兵等, 2008; 王涛等, 2008; 吴珍汉和张作辰, 2008)。通过对科学钻探的直接取样,开展深部应力测量,获得应力随深度的变化曲线,可用来分析震源附近的应力状态(许志琴等, 2008)。陈群策研究团队对龙门山断裂带所在的区域进行了大量较浅表的地应力实地测量工作,反映了该区域复杂的应力状态(陈群策等, 2012; 杜建军等, 2013; 丰成君等, 2013; 孟文等, 2013; 秦向辉等, 2013)。不同学者对余震进行了重新定位以确定发震断层更加精确的三维产状,对余震震源机制解、余震频度和时空迁

移特点等进行了分析和总结(黄媛等, 2008; 华卫等, 2009; 黄玉婷等, 2012; 易桂喜等, 2012)。闻学泽等(2009)利用历史地震目录资料分析了汶川 $M_s8.0$ 级大地震的历史地震背景及现今地震活动特点,发现在2008年之前的1100~1700年中,龙门山断裂带未发生7级以上的地震,并形成了一个地震空区。

汶川大地震震源区的地震波波速在深度和横向上都存在不均匀性,尤其是龙门山断裂带两侧最为显著,P波(或S波)速度差异可达 $\pm 5\%$ 以上(朱介寿, 2008; 郭飏等, 2009; 雷建设等, 2009; 刘启元等, 2009)。一些学者利用深地震反射剖面数据研究了青藏高原东缘的地壳结构,对龙门山地区的隆升机制进行了研究(Guo et al., 2013)。

汶川大地震的野外地质考察、主震震源区的应力测量、余震分布和机制解、主震震源区的地震波速度结构等研究工作的最新进展,为研究2008年汶川大地震的孕震、同震和震后变形的完整动力学过程,提供了第一手的研究资料和工作基础。陈祖安等(2009)将有限元和三维流变非连续变形相结合,考虑块体之间的相互作用,模拟结果表明龙门山断裂带东西两侧地势、地壳厚度、分层与物性显著变化对汶川大地震的孕育起到了关键作用;Zhu and Zhang (2013)利用有限元模型研究了2008年汶川大地震的震间、同震变形;Liu et al. (2015)还研究了地壳缩短对青藏高原东缘隆升的影响,对高地形和低汇聚速率之间的矛盾作出了合理的解释;尹力和罗纲(2018)利用有限元模型考虑了岩石圈流变结构和断裂带几何形态对地表变形的影响,研究了龙门山断裂带的地震循环过程不同阶段的地表变形特点,表明短期变形和长期变形之间存在一定的差异。

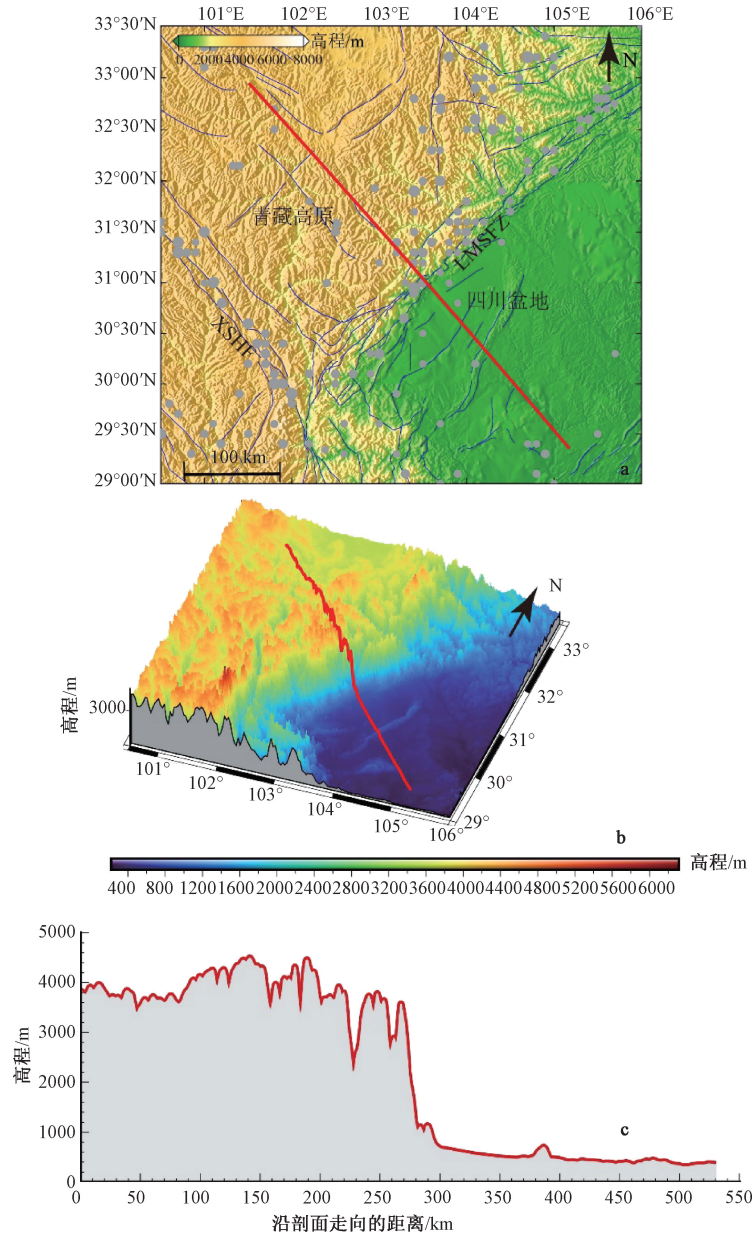
此次研究利用自主研发的黏弹性有限元程序,模拟了2008年汶川大地震的孕震、同震和震后变形的完整动力学过程,与已有结果比较吻合,能够反映孕震、同震及震后变形之间的关系,有助于进一

步认识大地震应力积累、释放、调整的特点。

1 模型与方法

汶川大地震的发震构造背景和龙门山断裂带附近的地形起伏如图 1 所示。龙门山断裂带长约 470 km、宽约 50 km，呈北东至南西展布，是青藏

东缘松潘甘孜地块与四川盆地的连接部位 (Yin and Nie, 1996)。它由一系列断裂带组成，依次为：汶川-茂县断裂带 (后山断裂带)、映秀-北川断裂带 (中央断裂带)、灌县-安县断裂带 (前山断裂带) 以及山前隐伏断裂带 (邓起东等, 1994; 李勇等, 2006; Jia et al., 2006)。其中，映秀-北川断裂带是 2008 年汶川大地震的主要发震断裂带。



a—地质构造背景图 (彩色底图显示的是研究区域的地表高程, 红线代表文中选取的横跨龙门山断裂带的研究剖面, 蓝线代表研究区域的主要活动断裂带, 灰色圆圈代表研究区域大于 5.0 级的历史大地震震中, LMSFZ—龙门山断裂带; XSHF—鲜水河断裂); b—研究区域的三维地表高程分布图; c—研究剖面的地表高程图

图 1 2008 年汶川地震的地质构造背景和龙门山断裂带地表起伏图

Fig. 1 Geological background of the 2008 Wenchuan earthquake and surface relief map of the Longmenshan fault zone. (a) Geological background map. The color base map shows the surface elevation of the study area. Red line demotes the selected section across the Longmenshan fault zone. Blue lines represent the main active faults in the study area. Grey circles represent the epicenters of historical earthquakes with magnitude greater than 5.0. LMSFZ—the Longmenshan fault zone, XSHF—the Xianshuihe fault. (b) Three-dimensional surface elevation distribution map of the study area. (c) Surface elevation map of the study section.

为了研究2008年孕震、同震及震后变形动力学的全过程,文中选取了一条垂直于龙门山断裂带走向的剖面(图1a中的红线;101.509°~105.177°E;29.353°~32.949°N),根据地震层析成像的最新结果,建立了一个二维平面应变黏弹性有限元模型(胡才博,2009;孟秋,2020;孟秋等,2020;图2)。模型采用分层材料,上地壳为各向同性的弹性材料(灰色和蓝色),断裂带为横观各向同性的弹性材料(弹性层中的曲线段),中下地壳和上地幔采用Maxwell黏弹性材料,从而可以研究重力和构造应力作用下地震的孕育、震后的黏弹性松弛。文中涉及到的三种不同介质材料,其本构方程根据已有研究整理得到(许鹤华,2002;付真,2008;胡才博,2009;尹祥础,2011;孟秋,2020;孟秋等,2020)。

(1) 上地壳是各向同性弹性体,其本构方程为:

$$\sigma = D\varepsilon, \quad (1)$$

其中, $\sigma = \{\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \sigma_{xy}\}^T$, 为应力(下同); $\varepsilon = \{\varepsilon_{xx} \ \varepsilon_{yy} \ \varepsilon_{xy}\}^T$, 为应变(下同); $D = \begin{bmatrix} K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 2G \end{bmatrix}$ 为弹性矩阵, K 、 G 分别为弹性体的体积模量和剪切模量。

(2) 断裂带介质是横观各向同性弹性体,其本构方程为:

$$\sigma' = D'\varepsilon', \quad (2)$$

其中, σ' 、 ε' 分别为材料主轴坐标系下的应力和应

变,形式与公式(1)相同; $D' = \begin{bmatrix} a(1 - av_2^2)b & av_2(1 + v_1)b & 0 \\ av_2(1 + v_1)b & (1 - v_1^2)b & 0 \\ 0 & 0 & 2G_2 \end{bmatrix}$, $a = \frac{E_1}{E_2}$, $b = \frac{E_2}{(1 + v_1)(1 - v_1 - 2v_2^2a)}$, E_1 、 E_2 分别为面的环向和面的法向的杨氏模量, v_1 、 v_2 分别为面内和面的法向的泊松比, G_2 是与面的法向有关的剪切模量。

(3) 中下地壳和上地幔为Maxwell黏弹性体,平面应变Maxwell黏弹性体的本构方程为:

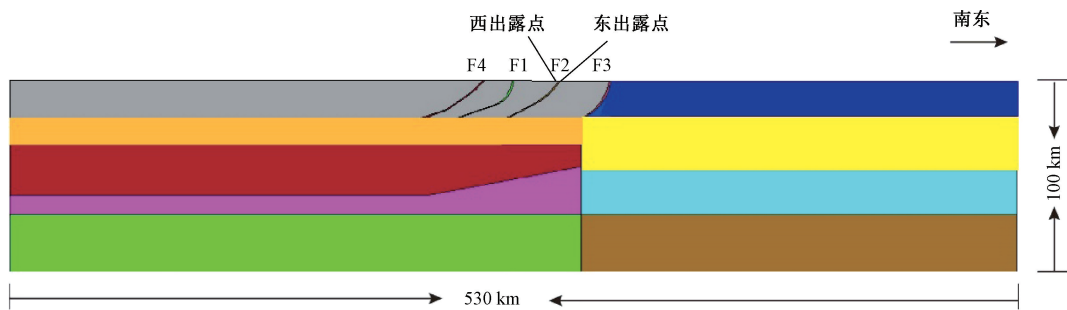
$$\dot{\sigma} + \alpha\sigma = D\dot{\varepsilon} + Q\varepsilon, \quad (3)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{G}{\eta}, \quad D = \begin{bmatrix} K + \frac{4G}{3} & K - \frac{2G}{3} & 0 \\ K - \frac{2G}{3} & K + \frac{4G}{3} & 0 \\ 0 & 0 & 2G \end{bmatrix},$$

$Q = \frac{KG}{\eta} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, K 、 G 、 η 分别为Maxwell黏弹性体的体积模量、剪切模量和剪切黏度, $\dot{\sigma}$ 、 $\dot{\varepsilon}$ 分别为应力、应变对时间的变化率。

1.1 几何模型和材料模型

模型水平方向为530 km,深度方向为100 km,主要发震断裂带为映秀-北川断裂带(图2)。断裂带几何形态来自于相关学者的地质剖面 and 地震层析成像结果(朱介寿,2008;黄晓萍,2012),断裂带倾角浅部较大,可达70°,从浅到深逐渐变小。断裂带有一定厚度,厚度500~1000 m。



灰色和深蓝色为各向同性弹性层; F1—龙门山后山断裂带, F2—龙门山中央断裂带(映秀-北川断裂带), F3—龙门山前山断裂带, F4—龙门山后山次级断裂带, 均为横观各向同性弹性材料; 其余各层均为Maxwell黏弹性层

图2 有限元模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the finite element model.

Gray and dark blue regions are isotropic elastic layers. F1—the Longmenshan range-back fault zone; F2—the Longmenshan range-central fault zone; F3—the Longmenshan range-front fault zone; F4—the Longmenshan secondary range-back fault zone. Other regions are the Maxwell viscoelastic layers.

研究区龙门山断裂带两侧的 P 波速度随深度的分布如表 1 所示。上地壳、中下地壳和上地幔的密度也是分层分布的, 分别为 2600 kg/m^3 、 2700 kg/m^3 、 3000 kg/m^3 。泊松比取 0.25, 杨氏模量由密度、P 波速度和泊松比估算得到 (胡才博, 2009)。

表 1 龙门山断裂带两侧 P 波速度随深度的分布表 (黄晓萍, 2012)

Table 1 Distribution of P-wave velocity with depth on both sides of the Longmenshan fault zone (Huang, 2012)

龙门山断裂带西侧 (松潘甘孜地块)		龙门山断裂带东侧 (四川盆地)	
界面深度/ km	P 波速度/ (km/s)	界面深度/ km	P 波速度/ (km/s)
0	5.0	0	4.5
4	5.4	3	5.0
7	5.8	7	5.4
10	6.0	10	6.0
15	6.2	15	6.4
30	6.4	25	6.8
40	6.7	40	7.5
50	6.9	50	8.0
60	7.8	60	8.3
70~100	8.3	70~100	8.3

黏度也是分层分布的, 其中映秀-北川断裂带西侧中地壳、下地壳和上地幔三层的黏度分别为 $5.0 \times 10^{18} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $1.0 \times 10^{21} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 、 $2.0 \times 10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$; 映秀-北川断裂带东侧分两层, 中地壳的黏度为 $1.0 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 下地壳和上地幔的黏度为 $2.0 \times 10^{22} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ (尹力和罗纲, 2018)。

考虑到初始地形对模拟结果的影响, 文中在几何模型表面加入了现今地形高程的 10% 作为计算的初始地形 (图 2), 由于松潘甘孜地块高程要高于四川盆地高程, 模拟了 40 万年的初始地形演化, 作为 2008 年汶川大地震模拟的一个约束条件。

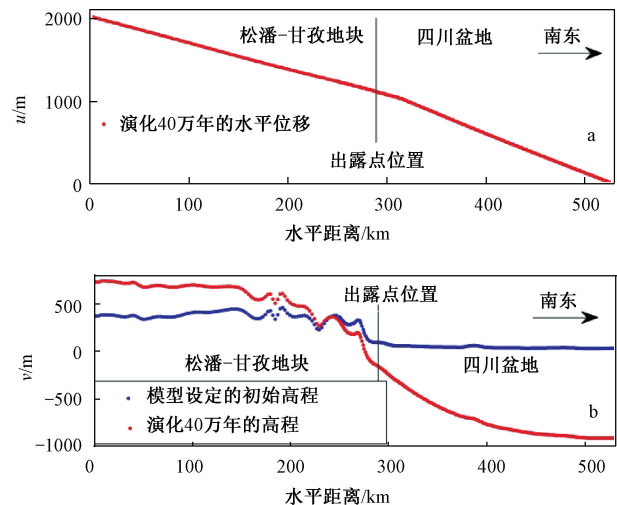
1.2 边界条件

为了研究 2008 年汶川地震的孕震、同震及震后变形全过程, 文中的有限元数值模拟分为 3 个阶段: ①初始构造和重力加载阶段, 0~40 万年, 共 200 步, 得到初始背景应力场和初始的地表起伏差异; ②长期构造加载阶段, 左侧施加向东的 5 mm/a 速度边界条件 (尹力和罗纲, 2018), 持续 3000 年, 共 300 步; ③同震及震后变形阶段, 通过横观各向同性弹性断裂带材料弱化来模拟同震及震后变形 (胡才博, 2009; 孟秋, 2020; 孟秋等, 2020), 10 km 以浅剪切模量降低为原来的 20%, 10~20 km 深度剪切模量降低为原来的 50%,

文中采用的黏弹性模型是准静态模型, 为了区分同震变形和震后变形, 将同震变形的计算时间步长设定了 120 s (王卫民等, 2008), 震后变形的计算时间步长改为了 1 年, 一共计算了 150 年。

2 模拟计算结果

根据上述黏弹性平面应变有限元模型, 文中模拟得到孕震阶段初始位移场 (图 3)。2008 年汶川地震的主要发震断裂带映秀-北川断裂带的东、西出露点 (图 2) 位于图 3a 的横坐标 289 km 处。530 km 长的剖面经过 40 万年的演化发生了 2 km 的水平缩短, 其中断裂带出露点两侧的位移梯度不同 (图 3a)。以现今地形高程的 10% 为模型初始高程 (图 3b 的蓝色点线), 显示映秀-北川断裂带的西侧松潘甘孜地块的地表垂直位移明显高于东侧的四川盆地 (图 3b)。在此初始高程基础上 (图 3b 的蓝色点线), 模拟得到的 40 万年以来的高程演化 (图 3b 的红色点线), 发现映秀-北川断裂带两侧的地形差异越来越大, 与现今地形高程更加接近。但由于模拟时间较短 (40 万年), 还远远没有达到 600~4000 m 的现今高程差异。



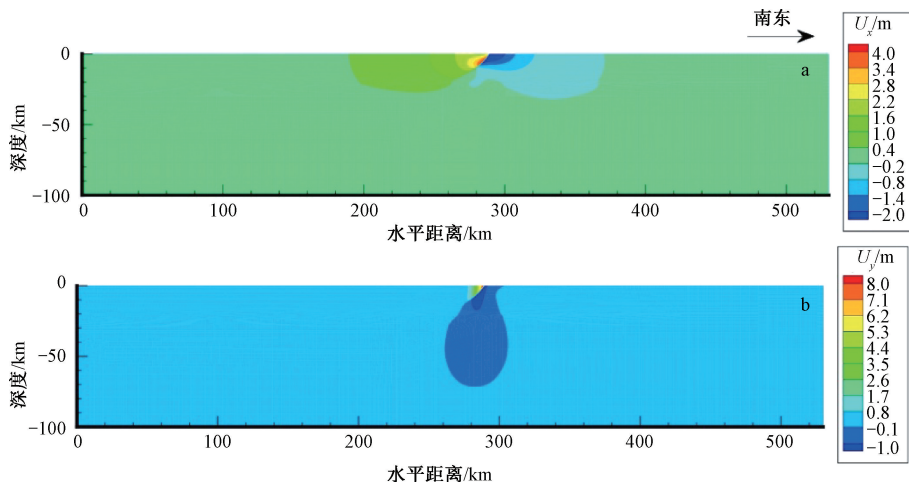
a—演化 40 万之后的汶川地震初始地表水平位移 u ; b—模型设定的初始高程和演化 40 万年之后的汶川地震地表垂直位移 v

图 3 模型设定的初始位移和演化 40 万年之后的汶川地震初始位移

Fig. 3 Initial displacement specified by the model and initial displacement before the 2008 Wenchuan earthquake after 400,000 years evolution by the model. (a) Initial surface horizontal displacement u before the 2008 Wenchuan earthquake after 400,000 years evolution by the model. (b) Initial vertical displacement specified by the model and initial vertical displacement v before the 2008 Wenchuan earthquake after 400,000 years evolution by the model.

文中模拟计算得到的2008年汶川地震的同震位移分布如图4所示,结果表明汶川大地震具有典型的逆冲断层机制。不论是水平位移,还是垂直位移,都表明上盘位移显著大于下盘位移,与以

往的研究结果一致(Shen et al., 2009; 王敏, 2009; 张国宏等, 2010)。同震水平位移的最大值不在地表,而是位于断裂带中部,而垂直位移的最大值位于断裂带出露地表处。



a—同震水平位移变化 U_x ; b—同震垂直位移变化 U_y

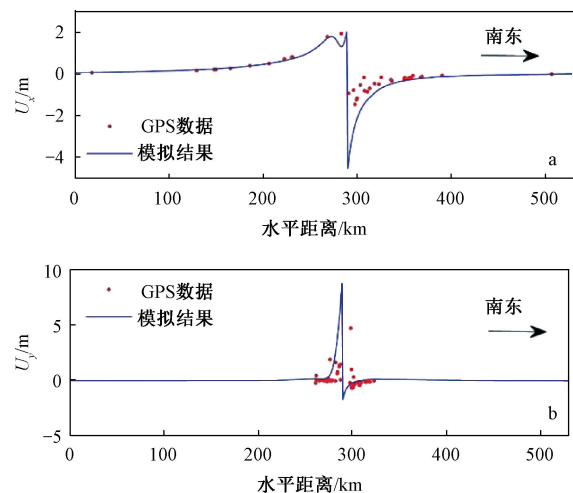
图4 2008年汶川大地震的同震位移等值线图

Fig. 4 Coseismic displacement contour map of the 2008 Wenchuan earthquake. (a) Coseismic horizontal displacement U_x . (b) Coseismic vertical displacement U_y .

通过地表同震位移的分布可以看出(图5),同震位移变化主要集中在断裂带出露地表的两侧附近,显示了映秀-北川断裂带的逆冲变形机制,远场的同震变化逐渐趋近于零。其中同震水平位移结果与GPS观测资料(Wang et al., 2011)比较吻合,尤其是上盘模拟结果符合度较高,下盘模拟结果在近场处计算结果绝对值偏大,远场模拟结果比较吻合(图5a)。同震垂直位移结果与GPS观测资料(Wang et al., 2009)稍差一些(图5b)。

2008年汶川大地震引起的应力变化见图6所示,包括两个正应力变化和一个剪应力变化。水平正应力大于零的区域(图6a)代表水平方向的拉应力增加,垂直正应力大于零的区域(图6b)代表垂直方向的拉应力增加,剪应力分量在映秀-北川断裂带两侧符号相反(图6c)。

震后7年内测线附近的GPS数据较少,尤其缺乏震后GPS垂直位移变化的观测资料。将2008年汶川大地震7年后的震后变形模拟结果与实测的相同时间段的震后GPS资料进行对比可以发现,7年后的震后水平位移结果与GPS资料(Diao et al., 2018)较为吻合,并且上盘结果吻合度较高(图7a)。震后7年近场的垂直位移变化可达10 cm以上(图7b),尚缺乏相应时间段的震后GPS垂



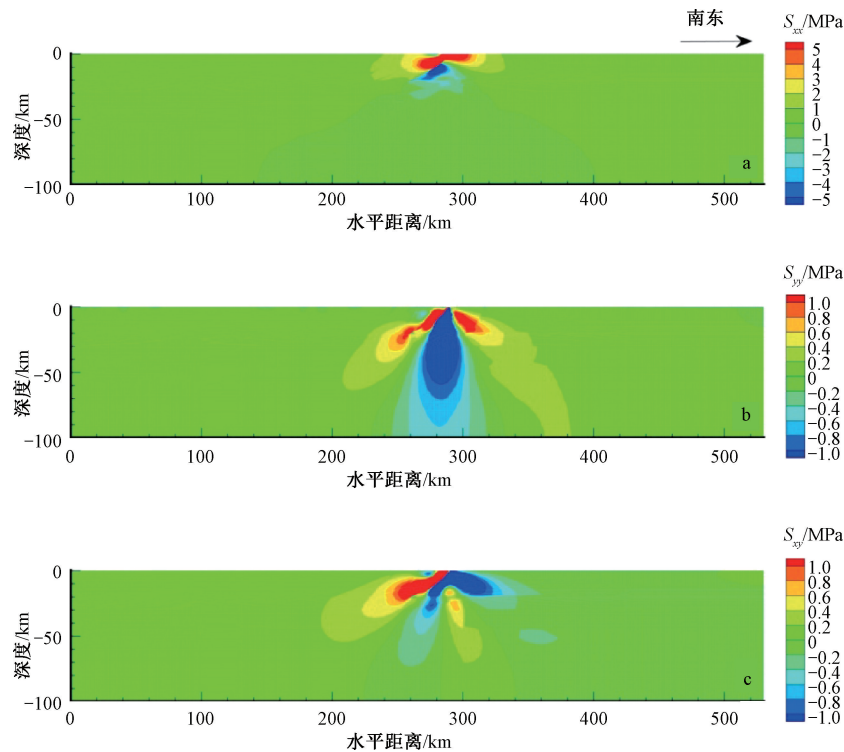
a—同震地表水平位移变化 U_x ; b—同震地表垂直位移变化 U_y

图5 2008年汶川大地震的地表同震位移分布

Fig. 5 Surface coseismic displacement of the 2008 Wenchuan earthquake. (a) Coseismic horizontal displacement U_x . (b) Coseismic vertical displacement U_y .

直位移资料与之对比分析。

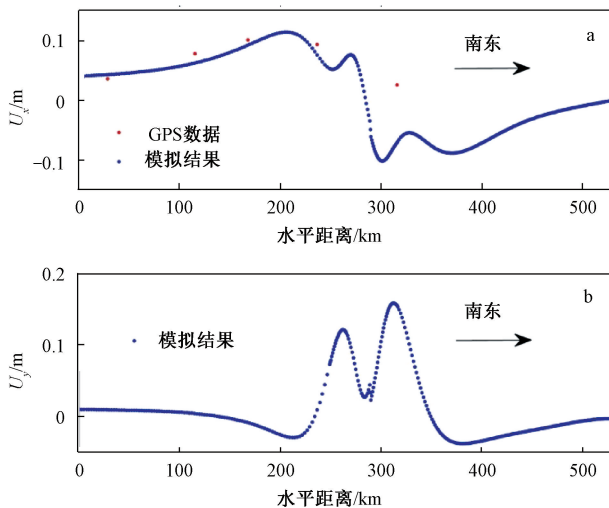
通过模拟计算获得的汶川大地震50年后和100年后的位移变化等值线图(图8,图9)与同震位移变化(图4)对比,显示震后50年和震后100年后的水平位移变化影响的范围出现了明显的



a—同震水平正应力变化 S_{xx} ; b—同震垂直正应力变化 S_{yy} ; c—同震剪应力变化 S_{xy}

图 6 2008 年汶川大地震引起的同震应力变化

Fig. 6 Coseismic stress changes caused by the 2008 Wenchuan earthquake. (a) Coseismic horizontal normal stress change S_{xx} . (b) Coseismic vertical normal stress change S_{yy} . (c) Coseismic shear stress change S_{xy} .



a—水平位移变化 U_x (平行于图 1a 的红色剖面); b—垂直位移变化 U_y

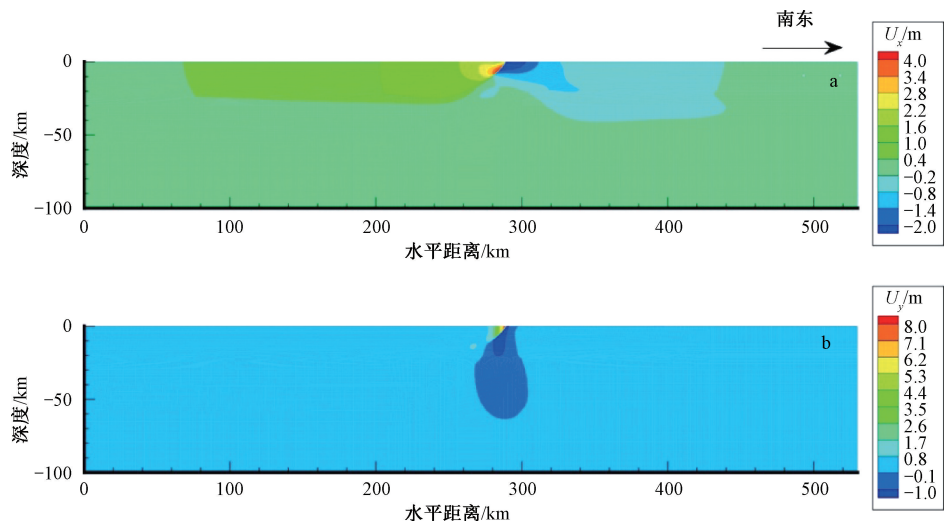
图 7 2008 年汶川大地震之后 7 年的震后位移 (去掉同震位移后)

Fig. 7 Postseismic displacement 7 years after the 2008 Wenchuan earthquake (Coseismic displacement is removed). (a) Horizontal displacement U_x (parallel to the red section in Fig. 1a). (b) Vertical displacement U_y .

逐渐扩大现象 (图 8a, 图 9a), 垂直位移变化在四川盆地内部出现了较为明显的沉降, 中心位置大约位于剖面水平距离的 400 km 处 (图 8b, 图 9b)。

2008 年汶川大地震之后, 映秀-北川断裂带西侧和东侧出露点 (图 2) 的水平位移和垂直位移随时间的变化曲线如图 10 和图 11 所示。震后 150 年内, 两个出露点的水平位移和垂直位移随时间都是非线性变化, 反映了中下地壳和上地幔的黏弹性松弛效应。

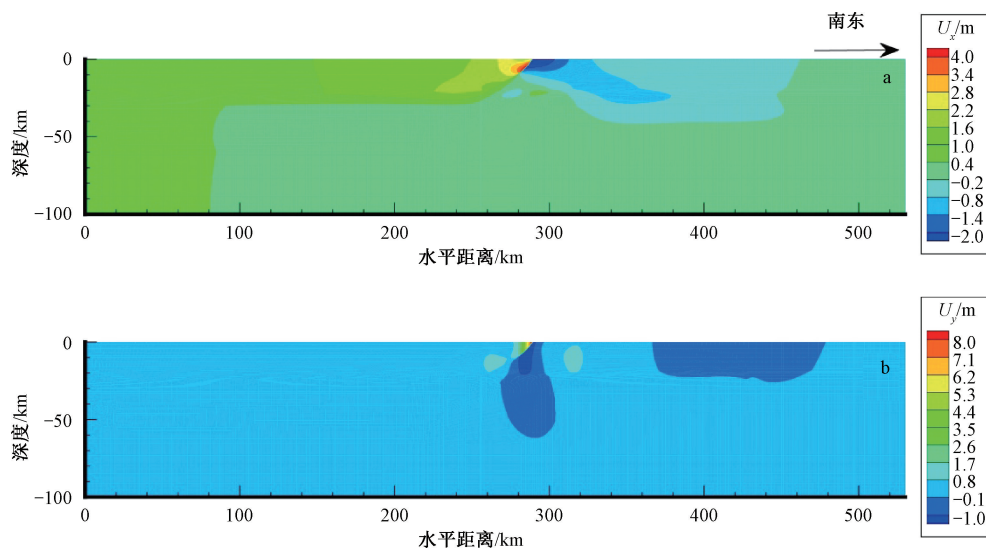
进一步计算平行于汶川大地震震源机制解主平面 (倾角 33°) 的正应力、剪应力和库仑应力变化, 包括同震结果 (图 12) 和震后 50 年的结果 (图 13), 其中计算库仑应力变化使用的有效摩擦系数为 0.4 (King et al., 1994; Toda et al., 2008)。结果显示, 汶川大地震之后, 10 km 以浅的映秀-北川断裂带两侧正应力变化大于零, 拉应力增加, 有利于降低岩石的摩擦强度, 而剪应力减小, 反映了大地震的应力释放过程, 库仑应力变化大于零的区域主要位于断裂带底部附近, 上盘靠近地表处以及下盘弹性及黏弹性层的交界处 (图 12)。



a—水平位移变化 U_x ; b—垂直位移变化 U_y

图8 汶川大地震50年后的位移变化

Fig. 8 Displacement changes 50 years after the Wenchuan earthquake. (a) Horizontal displacement change U_x . (b) Vertical displacement change U_y .



a—水平位移变化 U_x ; b—垂直位移变化 U_y

图9 汶川大地震100年后的位移变化

Fig. 9 Displacement changes 100 years after the Wenchuan earthquake. (a) Horizontal displacement change U_x . (b) Vertical displacement change U_y .

2008年汶川大地震50年后, 由于中下地壳和上地幔的黏弹性松弛, 正应力、剪应力及库仑应力变化的等值线图都与同震的结果有所不同, 可以明显看出应力在黏弹性层和弹性层之间重新调整(图13)。

3 讨论

与传统的地震位错理论的运动学模型相比,

文中采用的二维平面应变有限元模型是一个动力学模型, 需要构建一个初始应力场。目前, 关于龙门山断裂带的隆升变形存在两大不同的机制: ①龙门山地区及其周边存在若干地壳内部的拆离断层, 并且脆性地壳发生缩短增厚 (Avouac and Tapponnier, 1993; Tapponnier et al., 2001; Guo et al., 2013); ②青藏高原软弱的中下地壳物质向东流动在龙门山断裂带附近受到坚硬的四川盆地的

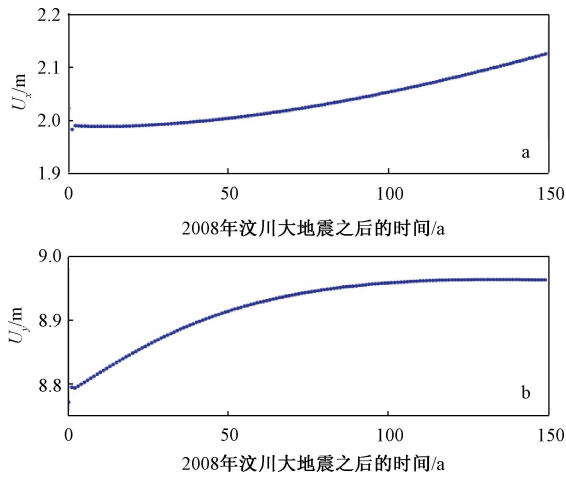
a—水平位移变化 U_x ；b—垂直位移变化 U_y

图 10 映秀-北川断裂带西侧出露点的震后位移随时间的变化曲线

Fig. 10 Postseismic displacement curves with time of the western outcrop point in the Yingxiu-Beichuan fault zone. (a) Horizontal displacement change U_x . (b) Vertical displacement change U_y .

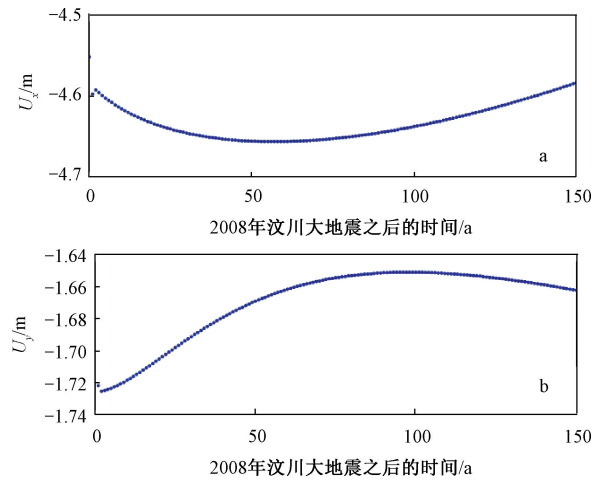
a—水平位移变化 U_x ；b—垂直位移变化 U_y

图 11 映秀-北川断裂带东侧出露点的震后位移随时间的变化曲线

Fig. 11 Postseismic displacement curves with time of the eastern outcrop point of the Yingxiu-Beichuan fault zone. (a) Horizontal displacement change U_x . (b) Vertical displacement change U_y .

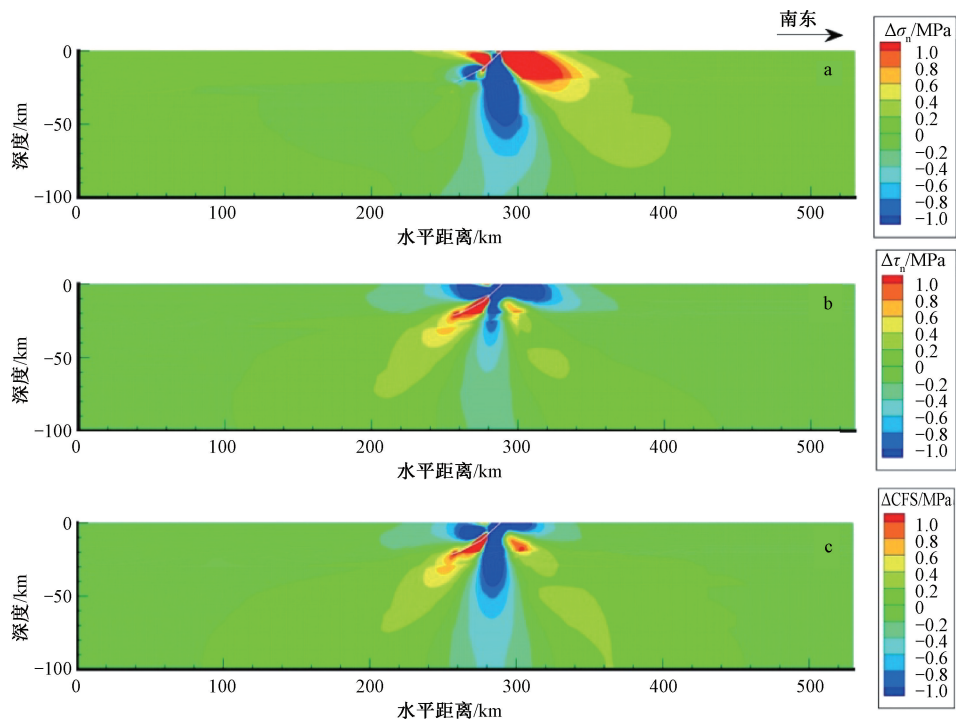
a—正应力 $\Delta\sigma_n$ ；b—剪应力 $\Delta\tau_n$ ；c—库仑应力变化 ΔCFS

图 12 2008 年汶川大地震平行于主震震源机制解主平面的同震结果

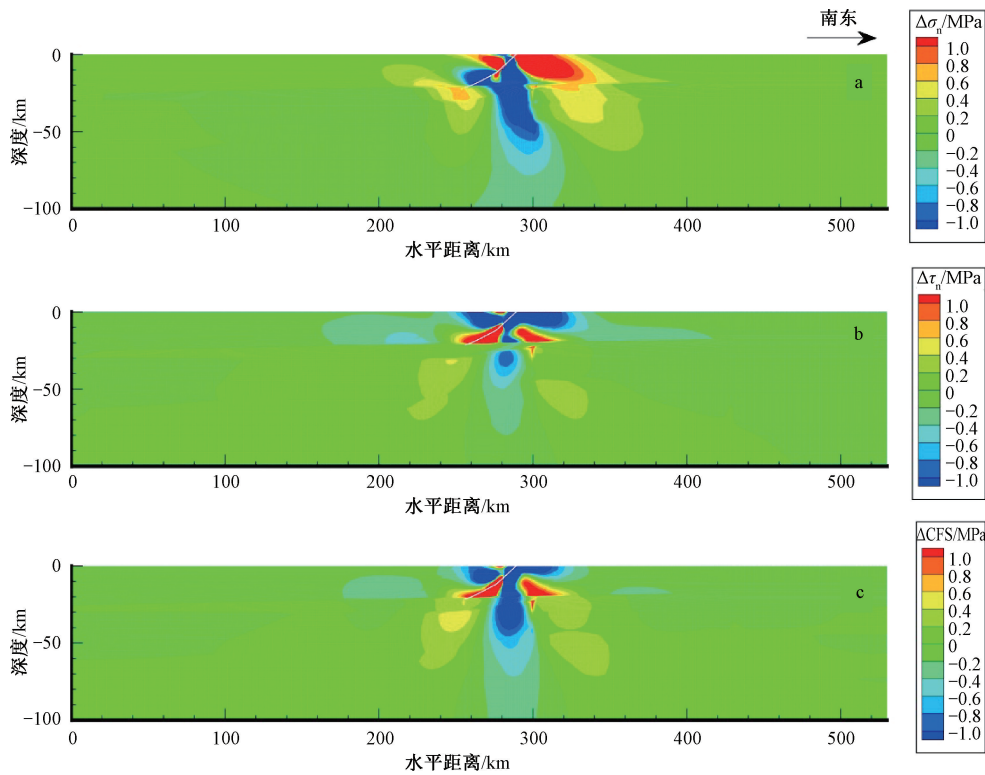
Fig. 12 Coseismic results of the 2008 Wenchuan earthquake parallel to the main plane of focal mechanism solution. (a) Normal stress change $\Delta\sigma_n$. (b) Shear stress change $\Delta\tau_n$. (c) Coulomb stress change ΔCFS .

阻挡, 堆积增厚 (Bird, 1991; Kirby et al., 2002; Burchfiel et al., 2008; Royden et al., 2008)。文中初

始应力场考虑了重力加载和初始构造, 能够反映出研究区域地表的初始地表起伏, 弹性层的应力状态满足

逆断层地震的发生条件, 也符合地应力测量所揭示的应力状态。初始地形经过 40 万年的演化, 松潘甘孜

地块和四川盆地的地表高程差异越来越大, 与龙门山断裂带两侧的现今地形起伏更加接近 (图 3b)。



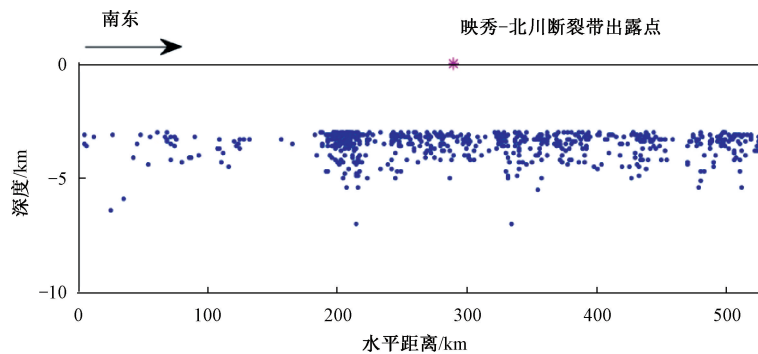
a—正应力变化 $\Delta\sigma_n$; b—剪应力变化 $\Delta\tau_n$; c—库仑应力变化 ΔCFS

图 13 2008 年汶川大地震平行于主震震源机制解主平面的震后 50 年结果

Fig. 13 Results 50 years after the 2008 Wenchuan earthquake parallel to the main plane of focal mechanism solution. (a) Normal stress change $\Delta\sigma_n$. (b) Shear stress change $\Delta\tau_n$. (c) Coulomb stress change ΔCFS .

2008 年汶川大地震之后至 2019 年的 $M 3.0$ 以上的余震在空间的分布如图 14 所示 (数据来源于中国地震台网中心、国家地震科学数据中心, <http://data.earthquake.cn>), 这些余震的深度大致分布在 3~8 km, 也就是文中模型的弹性层中, 而黏弹性层中并没有发生 3.0 级以上的余震。模拟的库仑应力变化结果 (图 12, 图 13) 并不能完全解释这些 3.0

级余震的分布, 原因至少有两个: 一是这些余震的震源机制并不完全与汶川大地震主震一致, 二是先存断裂和一些微破裂等材料复杂性未在此次模型中予以考虑。赵根模等 (2020) 对地震迁移的模式和特征有很好的总结, 显示了地震时空分布和动力学成因的复杂性, 因此, 还需要更进一步地研究汶川大地震余震的时空分布的动力学成因。



蓝点代表 2008 年汶川大地震的余震位置, 剖面位置与图 1a 中的红色测线一致

图 14 2008 年汶川大地震的余震在剖面上的投影分布

Fig. 14 Projection distribution of the aftershocks after the 2008 Wenchuan earthquake on the profile (The profile corresponds to the red survey line in Fig. 1a and blue points denote the aftershocks after the 2008 Wenchuan earthquake.)

在此基础上,文章还模拟了3000年以来的构造加载对弹性层及发震应力状态的变化,使得映秀-北川断裂带在第500步时处于临震状态。在最终的临震初始应力场作用下,通过降低映秀-北川断裂带的剪切模量,可以成功地模拟2008年汶川大地震的同震及震后变形,模拟得到的地表同震及7年后的震后变形结果与大地测量结果基本一致(图5,图7),都表明上盘显著地大于下盘的位移,逆冲断层机制显著。模型考虑了中下地壳及上地幔的黏弹性松弛效应,结果表明震后地表变形随时间有显著的变化,弹性层和黏弹性层之间存在明显的应力转移。

同时,文中建立的黏弹性有限元模型在以往地震层析成像的基础上考虑了介质的不均匀性(黄晓萍,2012),这种介质不均匀性首先体现在龙门山断裂带东西两侧的四川盆地和松潘甘孜地块横向上的不均匀性,同时还体现在纵向上的分层性,尤其是松潘甘孜地块在中下地壳存在一个地震波低速带和低黏度带。这是2008年汶川大地震孕震、同震和震后变形的物质条件。只有充分地在模型中体现出介质的横向和纵向上的不均匀性,才有可能对2008年汶川大地震的孕震、同震和震后变形的动力学机制有一个相对客观的认识和理解。

4 结论

文章利用自主研发的黏弹性有限元程序,研究了2008年汶川大地震的孕震、同震及震后变形完整的动力学过程,取得了以下主要认识:

(1) 初始应力场对于整个地震循环过程的影响很大,文中模拟得到的初始位移场显示出映秀-北川断裂带东西两侧的地形差异。初始应力场为整个地震循环过程的模拟提供了最基本的力学环境。

(2) 文中模拟得到的2008年汶川大地震的同震位移结果表明,汶川大地震主要属于逆冲断层机制,并且上盘变形明显大于下盘变形,这与地质考察和大地测量结果基本一致。

(3) 模拟结果表明2008年汶川大地震的震后位移及震后应力都明显地随时间变化,其中震后7年的模拟结果与大地测量结果基本一致,反映了中下地壳和上地幔的黏弹性松弛效应,地表的震

后变形、弹性层和黏弹性层之间的应力调整都较为显著。

致谢: 石耀霖院士、蔡永恩教授、皇甫鹏鹏博士对本研究中给予了帮助和指导,在此一并表示感谢!

References

- AVOUC J P, TAPPONNIER P, 1993. Kinematic model of active deformation in central Asia [J]. *Geophysical Research Letters*, 20 (10): 895-898.
- BIRD P, 1991. Lateral extrusion of lower crust from under high topography in the isostatic limit [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96 (B6): 10275-10286.
- BURCHFIELD B C, ROYDEN L H, VAN DER HILST R D, et al., 2008. A geological and geophysical context for the Wenchuan earthquake of 12 May 2008, Sichuan, People's Republic of China [J]. *GSA Today*, 18 (7): 4-11.
- CHEN Q C, FENG C J, MENG W, et al., 2012. Analysis of in situ stress measurements at the northeastern section of the Longmenshan fault zone after the 5.12 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (12): 3923-3932. doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 005. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z A, LIN B H, BAI W, et al., 2009. The mechanism of generation of May 12, 2008 $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52 (2): 408-417.
- DENG Q D, CHEN S F, ZHAO X L, 1994. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan mountains and its adjacent regions [J]. *Seismology and Geology*, 16 (4): 389-403. (in Chinese)
- DENG Q D, CHEN G H, ZHU A L, 2011. Discussion of rupture mechanisms on the seismogenic fault of the 2008 $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake [J]. *Science China Earth Sciences*, 54 (9): 1360-1377. doi: 10.1007/s11430-011-4230-1.
- DIAO F Q, WANG R J, WANG Y B, et al., 2018. Fault behavior and lower crustal rheology inferred from the first seven years of postseismic GPS data after the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 495: 202-212.
- DONG S W, ZHANG Y Q, LONG C X, et al., 2008. Surface rupture investigation of the Wenchuan $M_s 8.0$ earthquake of May 12th, 2008, West Sichuan, and analysis of its occurrence setting [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 29 (3): 392-396. (in Chinese with English abstract)
- DU J J, CHEN Q C, MA Y S, et al., 2013. Faults activity and stress state in the northeast segment of Longmenshan faults zone [J]. *Progress in Geophysics*, 28 (3): 1161-1170. (in Chinese with English abstract)
- FENG C J, CHEN Q C, TAN C X, et al., 2013. Analysis on current in-situ stress state in northern segment of Longmenshan fault belt [J]. *Progress in Geophysics*, 28 (3): 1109-1121. (in Chinese with English abstract)
- FU Z, 2008. Viscoelastic LDDA method for contact problems and its

- applications to studies on mechanism of postseismic deformation [D]. Beijing: Peking University: 41-48. (in Chinese with English abstract)
- GUO B, LIU Q Y, CHEN J H, et al., 2009. Teleseismic P-wave tomography of the crust and upper mantle in Longmenshan area, west Sichuan [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (2): 346-355. (in Chinese with English abstract)
- GUO X Y, GAO R, KELLER G R, et al., 2013. Imaging the crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau and implications for the uplift of the Longmen Shan range [J]. Earth and Planetary Science Letters, 379: 72-80.
- HU C B, 2009. A new method to study earthquake triggering and continuous evolution of stress field [D]. Beijing: Peking University: 23-28. (in Chinese with English abstract)
- HUA W, CHEN Z L, ZHENG S H, 2009. A study on segmentation characteristics of aftershock source parameters of Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake in 2008 [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (2): 365-371. (in Chinese with English abstract)
- HUANG X P, 2012. Relocation of earthquakes before and after Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake and the study of focal mechanism [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 10. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Y T, ZHU J S, CAO J M, et al., 2012. Relocation of the epicentre before and after Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 34 (3): 272-278. (in Chinese with English abstract)
- HUANG Y, WU J P, ZHANG T Z, et al., 2008. Relocation of the $M_{\text{s}}8.0$ Wenchuan earthquake and its aftershock sequence [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 51 (12): 1703-1711. doi: 10.1007/s11430-008-0135-z.
- JIA D, WEI G Q, CHEN Z X, et al., 2006. Longmen Shan fold-thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China; new insights from hydrocarbon exploration [J]. AAPG Bulletin, 90 (9): 1425-1447.
- KING G C P, STEIN R S, LIN J, 1994. Static stress changes and the triggering of earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 84 (3): 935-953.
- KIRBY E, REINERS P W, KROL M A, et al., 2002. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He thermochronology [J]. Tectonics, 21 (1): 1001. doi: 10.1029/2000TC001246.
- LEI J S, ZHAO D P, SU J R, et al., 2009. Fine seismic structure under the Longmenshan fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (2): 339-345. (in Chinese with English abstract)
- LI H B, WANG Z X, FU X F, et al., 2008. The surface rupture zone distribution of the Wenchuan earthquake ($M_{\text{s}}8.0$) happened on May 12th, 2008 [J]. Geology in China, 35 (5): 803-813. (in Chinese with English abstract)
- LI Y, ZHOU R J, DENSMORE A L, et al., 2006. Geomorphic evidence for the late Cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau [J]. Quaternary Sciences, 26 (1): 40-51. (in Chinese with English abstract)
- LI Z Q, YUAN Y F, LI X L, et al., 2008. Preliminary research on the characteristics of the $M_{\text{s}}8.0$ Wenchuan earthquake hazard [J]. Seismology and Geology, 30 (4): 855-876. (in Chinese with English abstract)
- LIU C, ZHU B J, YANG X L, 2015. How does crustal shortening contribute to the uplift of the eastern margin of the Tibetan Plateau? [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 98: 18-25.
- LIU Q Y, LI Y, CHEN J H, et al., 2009. Wenchuan $M_{\text{s}}8.0$ earthquake; preliminary study of the S-wave velocity structure of the crust and upper mantle [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (2): 309-319. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q, 2020. The independent development of viscoelastic finite element program and its application on surface deformation and seismic migration under ice load [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences: 9-29. (in Chinese with English abstract)
- MENG Q, HU C B, SHI Y L, 2020. The study of post-glacial rebound and stress evolution since the Last Ice Age in the northern North Sea of Norway by using viscoelastic finite element model [J]. Chinese Journal of Geophysics, 63 (10): 3751-3763. doi: 10.6038/cjg2020N0382. (in Chinese with English abstract)
- MENG W, CHEN Q C, WU M L, et al., 2013. Research on segmentation and characteristic of tectonic stress field of Longmenshan fault zone [J]. Progress in Geophysics, 28 (3): 1150-1160. (in Chinese with English abstract)
- QIN X H, CHEN Q C, TAN C X, et al., 2013. Analysis of current geostress state and seismic risk in southwest segment of Longmenshan fracture belt [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 32 (S1): 2870-2876. (in Chinese with English abstract)
- ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D, 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau [J]. Science, 321 (5892): 1054-1058. doi: 10.1126/science. 1155371.
- SHEN Z K, SUN J B, ZHANG P Z, et al., 2009. Slip maxima at fault junctions and rupturing of barriers during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Nature Geoscience, 2 (10): 718-724. doi: 10.1038/NCEO636.
- TAPPONNIER P, XU Z Q, RONGER F, et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau [J]. Science, 294 (5547): 1671-1677. doi: 10.1126/science. 105978.
- 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 [J]. Geophysical Research Letters, 35 (17): L17305. doi: 10.1029/2008GL034903.
- WANG M, 2009. Coseismic slip distribution of the 2008 Wenchuan great earthquake constrained using GPS coseismic displacement field [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52 (10): 2519-2526. (in Chinese with English abstract)
- WANG Q L, CUI D X, ZHANG X, et al., 2009. Coseismic vertical deformation of the $M_{\text{s}}8.0$ Wenchuan earthquake from repeated

- levelings and its constraint on Listric fault geometry [J]. *Earthquake Sencie*, 22 (6): 595-602. doi: 10.1007/s11589-009-0595-z.
- WANG Q, QIAO X J, LAN Q G, et al., 2011. Rupture of deep faults in the 2008 Wenchuan earthquake and uplift of the Longmen Shan [J]. *Nature Geoscience*, 4 (9): 634-640. doi: 10.1038/NGEO1210.
- WANG T, MA Y S, LONG C X, et al., 2008. Fault activity of the Wenchuan earthquake in Sichuan, China and seismic secondary geohazards [J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (11): 1913-1922. (in Chinese with English abstract)
- WANG W M, ZHAO L F, LI J, et al., 2008. Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 51 (5): 1403-1410. (in Chinese with English abstract)
- WEN X Z, ZHANG P Z, DU F, et al., 2009. The background of historical and modern seismic activities of the occurrence of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan, Sichuan, earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 52 (2): 444-454. (in Chinese with English abstract)
- WU J, LU H S, LIU A W, 2008. Preliminary study on correlation between seismic intensity and earthquake source process in Wenchuan earthquake of Sichuan, China [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 3 (3): 224-229. (in Chinese with English abstract)
- WU Z H, ZHANG Z C, 2008. Seismic deformation and co-seismic displacement of the M_s 8.0 Wenchuan Earthquake in Sichuan, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (12): 2067-2075. (in Chinese with English abstract)
- XU H H, LIU J Z, CAI Y E, 2002. Two dimensional numerical simulation of subduction of continental deep subduction [C] // Annual journal of Chinese geophysical society 2002, proceedings of the 18th annual meeting of the Chinese Geophysical Society. Beihai: Earthquake Press. (in Chinese)
- XU Z Q, LI H B, WU Z L, 2008. Wenchuan earthquake and scientific drilling [J]. *Acta Geologica Sinica*, 82 (12): 1613-1622. (in Chinese with English abstract)
- YAN D P, SUN M, GONG L X, et al., 2020. Composite structure and growth of the Longmenshan foreland thrust belt in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (5): 615-633. doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 05. 054. (in Chinese with English abstract)
- YI G X, LONG F, ZHANG Z W, 2012. Spatial and temporal variation of focal mechanisms for aftershocks of the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55 (4): 1213-1227. doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 04. 017. (in Chinese with English abstract)
- YIN A, NIE S, 1996. A Phanerozoic palinspastic reconstruction of China and its neighboring regions [M] // YIN A, HARRISON M. The tectonic evolution of Asia. New York: Cambridge University Press; 442-485.
- YIN L, LUO G, 2018. Crustal deformation across the Longmen Shan fault zone from finite element simulation of seismic cycles [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61 (4): 1238-1257. doi: 10.6038/cjg2018L0248. (in Chinese with English abstract)
- YIN X C, 2011. *Solid Mechanics* [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press; 337-360. (in Chinese)
- ZHANG G H, QU C Y, WANG C S, et al., 2010. Inversion of slip distribution of 2008 Wenchuan M_w 7.9 earthquake constrained jointly by InSAR and GPS measurements [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 30 (4): 19-24. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO G M, WU Z H, LIU J, 2020. The types, characteristics and mechanism of seismic migration [J]. *Journal of Geomechanics*, 26 (1): 13-32. doi: 10.12090/j. issn. 1006-6616. 2020. 26. 01. 002. (in Chinese with English abstract)
- ZHU J S, 2008. The Wenchuan earthquake occurrence background in deep structure and dynamics of lithosphere [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 35 (4): 348-356. (in Chinese with English abstract)
- ZHU S B, ZHANG P Z, 2013. FEM simulation of interseismic and coseismic deformation associated with the 2008 Wenchuan Earthquake [J]. *Tectonophysics*, 584: 64-80.

附中文参考文献

- 陈群策, 丰成君, 孟文, 等, 2012. 5.12 汶川地震后龙门山断裂带东北段现今地应力测量结果分析 [J]. *地球物理学报*, 55 (12): 3923-3932. doi: 10.6038/j. issn. 0001-5733. 2012. 12. 005.
- 陈祖安, 林邦慧, 白武明, 等, 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震孕震机理研究 [J]. *地球物理学报*, 52 (2): 409-417.
- 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 [J]. *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 [J]. *中国科学: 地球科学*, 41 (11): 1559-1576.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等, 2008. 四川汶川 M_s 8.0 地震地表破裂构造初步调查与发震背景分析 [J]. *地球学报*, 29 (3): 392-396.
- 杜建军, 陈群策, 马寅生, 等, 2013. 龙门山断裂带东北段地应力状态与断裂活动性研究 [J]. *地球物理学进展*, 28 (3): 1161-1170.
- 丰成君, 陈群策, 谭成轩, 等, 2013. 龙门山断裂带东北段现今地应力环境研究 [J]. *地球物理学进展*, 28 (3): 1109-1121.
- 付真, 2008. 接触问题的粘弹性 LDDA 方法及其在震后变形机制研究中的应用 [D]. 北京: 北京大学; 41-48.
- 郭飏, 刘启元, 陈九辉, 等, 2009. 川西龙门山及邻区地壳上地幔远震 P 波层析成像 [J]. *地球物理学报*, 52 (2): 346-355.
- 胡才博, 2009. 研究地震触发和应力场连续演化的新方法 [D]. 北京: 北京大学; 23-28.
- 华卫, 陈章立, 郑斯华, 2009. 2008 年汶川 8.0 级地震序列震源参数分段特征的研究 [J]. *地球物理学报*, 52 (2): 365-371.
- 黄晓萍, 2012. 汶川 M_s 8.0 级地震前后重新定位以及震源机制的研究 [D]. 成都: 成都理工大学; 10.
- 黄玉婷, 朱介寿, 曹家敏, 等, 2012. 对汶川 8.0 级地震前后震源的重新定位 [J]. *物探化探计算技术*, 34 (3): 272-278.
- 黄媛, 吴建平, 张天中, 等, 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 38 (10): 1242-1249.

- 雷建设,赵大鹏,苏金蓉,等,2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理[J]. 地球物理学报, 52(2): 339-345.
- 李海兵,王宗秀,付小方,等,2008. 2008年5月12日汶川地震($M_s 8.0$)地表破裂带的分布特征[J]. 中国地质, 35(5): 803-813.
- 李勇,周荣军, DENSMORE A L, 等, 2006. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志[J]. 第四纪研究, 26(1): 40-51.
- 李志强,袁一凡,李晓丽,等,2008. 汶川 $M_s 8.0$ 特大地震破坏特征初步研究[J]. 地震地质, 30(4): 855-876.
- 刘启元,李昱,陈九辉,等,2009. 汶川 $M_s 8.0$ 地震:地壳上地幔S波速度结构的初步研究[J]. 地球物理学报, 52(2): 309-319.
- 孟秋,2020. 黏弹性有限元程序自主开发及其在冰载荷作用下的地表变形和地震迁移的应用研究[D]. 北京:中国科学院大学: 9-29.
- 孟秋,胡才博,石耀霖,2020. 利用黏弹性有限元模型研究挪威北海北部地区末次冰期以来的冰后回弹和应力演化[J]. 地球物理学报, 63(10): 3751-3763. doi: 10.6038/cjg2020N0382.
- 孟文,陈群策,吴满路,等,2013. 龙门山断裂带现今构造应力场特征及分段性研究[J]. 地球物理学进展, 28(3): 1150-1160.
- 秦向辉,陈群策,谭成轩,等,2013. 龙门山断裂带西南段现今地应力状态与地震危险性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 32(S1): 2870-2876.
- 王敏,2009. 基于GPS同震位移场约束反演2008年5.12汶川大地震破裂空间分布[J]. 地球物理学报, 52(10): 2519-2526.
- 王涛,马寅生,龙长兴,等,2008. 四川汶川地震断裂活动和次生地质灾害浅析[J]. 地质通报, 27(11): 1913-1922.
- 王卫民,赵连锋,李娟,等,2008. 四川汶川8.0级地震震源过程[J]. 地球物理学报, 51(5): 1403-1410.
- 闻学泽,张培震,杜方,等,2009. 2008年汶川8.0级地震发生的历史与现今地震活动背景[J]. 地球物理学报, 52(2): 444-454.
- 吴健,吕红山,刘爱文,2008. 汶川地震烈度分布与震源过程相关性的初步研究[J]. 震灾防御技术, 3(3): 224-229.
- 吴珍汉,张作辰,2008. 四川汶川 $M_s 8.0$ 级地震的地表变形与同震位移[J]. 地质通报, 27(12): 2067-2075.
- 许鹤华,刘金朝,蔡永恩,2002. 大陆深俯冲过程的二维数值模拟[C]//中国地球物理学会年刊2002:中国地球物理学会第十八届年会论文集. 北海:地震出版社.
- 许志琴,李海兵,吴忠良,2008. 汶川地震和科学钻探[J]. 地质学报, 82(12): 1613-1622.
- 颜丹平,孙铭,巩凌霄,等,2020. 青藏高原东缘龙门山前陆逆冲带复合结构与生长[J]. 地质力学学报, 26(5): 615-633. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.05.054.
- 易桂喜,龙锋,张致伟,2012. 汶川 $M_s 8.0$ 地震余震震源机制时空分布特征[J]. 地球物理学报, 55(4): 1213-1227. doi: 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.04.017.
- 尹力,罗纲,2018. 有限元数值模拟龙门山断裂带地震循环的地壳变形演化[J]. 地球物理学报, 61(4): 1238-1257. doi: 10.6038/cjg2018L0248.
- 尹祥础,2011. 固体力学[M]. 2版. 北京:地震出版社: 337-360.
- 张国宏,屈春燕,汪驰升,等,2010. 基于GPS和InSAR反演汶川 $M_w 7.9$ 地震断层滑动分布[J]. 大地测量与地球动力学, 30(4): 19-24.
- 张勇,冯万鹏,许力生,等,2008. 2008年汶川大地震的时空破裂过程[J]. 中国科学D辑:地球科学, 38(10): 1186-1194.
- 赵根模,吴中海,刘杰,2020. 地震迁移的类型、特征及机制讨论[J]. 地质力学学报, 26(1): 13-32. doi: 10.12090/j.issn.1006-6616.2020.26.01.002.
- 朱介寿,2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 348-356.

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

可扫码直接下载文章电子版,也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

