

汶川地震前后龙门山地区区域构造应力场演化的数值模拟*

苏生瑞 王琦 李鹏

(长安大学地质工程系 西安 710054)

摘要 以龙门山地区为研究对象,采用数值模拟方法,通过模拟强震发生前后以及发生时的构造应力场特征,得到了龙门山地区构造应力场变化规律。结果表明,龙门山地区在汶川地震到地震时到地震后的最大主应力和剪应力的数值和方向均发生了改变,最大主应力方向整体上由 NEE 变为 SEE,但在不同地区这种变化表现有所差异。剪应力在震前和震时均有局部区域出现了集中,特别是在映秀附近;但在地震后,区域内剪应力相对均匀分布,而且与地震前相比,剪应力在龙门山前山断裂和龙门山中央断裂分布的值得明显减小,在后山断裂附近分布的剪应力数值增大。同时地震后剪应力在龙门山中央断裂上集中的区域逐渐向东北方向移动。应力场变化规律与地震时的地表形变规律和震后余震的分布规律一致。

关键词 构造应力场 数值模拟 龙门山地区 汶川地震

中图分类号:P315.5 **文献标识码**:A

NUMERICAL MODELLING OF EVOLUTION OF TECTONIC STRESS FIELD IN STRONG EARTHQUAKE AREA

SU Shengrui WANG Qi LI Peng

(Department of Geological Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054)

Abstract This paper examines the tectonic stress field in the Longmenshan region where the Wenchuan 8.0 earthquake occurred in 2008. The evolution of tectonic stress field before-, during- and after-earthquake is studied with numerical modelling. It is found that from the time before main shock to the time after main shock, the regional stress field experienced complex change process. The magnitudes and orientations of principal stresses and shear stresses changed a great deal. The changes coincide well with the deformation caused by the earthquake and the distribution of the after-shocks.

Key words Tectonic stress field, Numerical modeling, Longmenshan region, Strong earthquake

1 引言

构造应力场是指一定空间范围内构造应力的分

布,它综合反映地壳中作用于地质体的与运动有关的各种动力^[1]。构造应力场的分布与演化规律研究是地震预报、区域稳定性评价和地质灾害研究等工作的重要基础。

* 收稿日期:2012-05-20;收到修改稿日期:2012-07-03.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41030749),国家自然科学基金重点项目(41072223)和中国地质调查局项目(1212010914025).

第一作者简介:苏生瑞,工程地质专业. Email: desusr@chd.edu.cn

强震区构造应力场的变化已经引起了广泛的关注。屠泓为等发现^[2], 1997年3月1日~2003年1月4日新疆伽师地区的地震断层性质及应力场均发生了较大变化, 而2003年2月24日起, 其地震断层性质和应力场方向又恢复到了第一时段的状态。蒋靖祥等^[3]根据对库尔勒台记录资料计算的计算得出, 2001年昆仑山口西 M 8.1 地震前主应力方向出现偏转变化, 最大偏转量达 83°, 主应力值变化达 1 400 kPa, 剪应力增大了 523 kPa。王凯英等^[4]通过对 1994~2000 年间川滇地区小震震源机制解的分析发现, 川滇地区的应力场存在以丽江—小金河断裂为界的分区特征, 而且丽江—小金河断裂以北地区在 1996 年前后发生过一次应力场转向事件。龙海英等^[5]由伽师强震群震源机制应力轴的变化, 发现 1997~1998 年伽师强震群震源区应力场经历了一系列的变化。

本文根据通过对龙门山地区的区域地质以及工程地质条件的研究建立了区域地质力学模型, 以实测地应力和区域地形变资料及汶川 5·12 地震震源机制解为依据, 采用数值模拟方法反演龙门山地区在汶川 5·12 地震前后以及发震时的构造应力场演变过程和规律, 以期对深入探讨青藏高原东缘地区区域地球动力学过程和预测地质灾害提供理论依据。

2 区域地质概况

研究区位于青藏高原东缘的松潘—甘孜地槽褶皱系, 南西被鲜水河断裂相截, 东部与扬子地台相邻, 北部为秦岭地槽褶皱系。

龙门山地区地质构造以发育 4 条走向 N45°E、倾向 NW、倾角 50°~75°的逆断裂为特征, 自东到西依次为山前隐伏断裂、龙门山前山断裂、龙门山中央断裂和龙门山后山断裂^[6~8], 组成具有前展式扩展特征的龙门山推覆构造带^[8, 9]。

区域构造应力场研究结果表明, 龙门山地区区域构造应力场主应力方向总体为 NNW-SSE 向, 但具有一定的分区变化性。其北东的松潘—龙门山地区主应力方向为 NEE-SWW 向, 其余地区构造应力场最大主压力方向为近东西向^[10]。

3 研究模型与技术路线

在建立模型时假设: (1) 模型处于二维应力状态; (2) 围岩为弹性各向同性材料; (3) 断裂厚度为 0; (4) 岩石服从 M-C 破坏准则。

结合龙门山地区构造应力场区域地质条件, 确定本次模拟的范围。范围地理坐标为 N101°~106°, E29°~34°, 其东西向长约 688km, 南北向宽约 770km, 面积约 5.3×10⁵km²。

通过分析前人对区域构造应力场研究成果, 龙门山地区区域构造应力受鲜水河断裂(F₂)、龙门山后山断裂(F₃)、中央断裂(F₄)、前山断裂(F₅)和岷江断裂(F₆)以及阿尼玛卿—略阳断裂(F₁)等, 因此, 本次模拟所建立的地质力学模型中主要包含了上述 6 条断裂。

本次力学模型中, 以上述 6 条断裂作为边界, 把模型分为 7 个区域(表 1, 图 1)。

本次工作对研究区域震前、震时和震后的位移分布规律和构造应力场进行了数值模拟, 将模拟结果与实际结合, 对震前、震时和震后应力场的变化规律进行详细的分析。前人获得了该区域的震前和震时 GPS 监测数据, 模拟中, 通过拟合上述 GPS 监测数据, 分别反演震前和震时的构造应力场。由于地震的发生, 不仅使断裂带积累的能量得以释放, 而且由于地震错动, 使断裂带岩体强度也有所降低, 模拟时, 通过改变断裂带的力学参数来反演震后应力场。

表 1 模型区域划分及各区主要物质组成

Table 1 Region division and materials of the regions of the model

分区代号	位置	主要组成	分区代号	位置	主要组成
A	秦岭地槽褶皱系	变质岩	E	龙门山后山断裂与中央断裂之间的地区	前震旦系杂岩体和震旦系、志留系和泥盆系浅变质岩
B	鲜水河断裂与龙门山后山断裂之间的区域	复理石类型的碎屑、深海复理石组合	F	龙门山中央断裂与前山断裂之间的区域	未变质的古生界和三叠系地层
C	鲜水河断裂以南地区	元古界杂岩体和前震旦纪花岗岩	G	龙门山后山断裂和阿尼玛卿—略阳断裂间	与 B 区岩体性质类似, 但强度稍高
D	扬子地台区域	第四系冲洪积物			

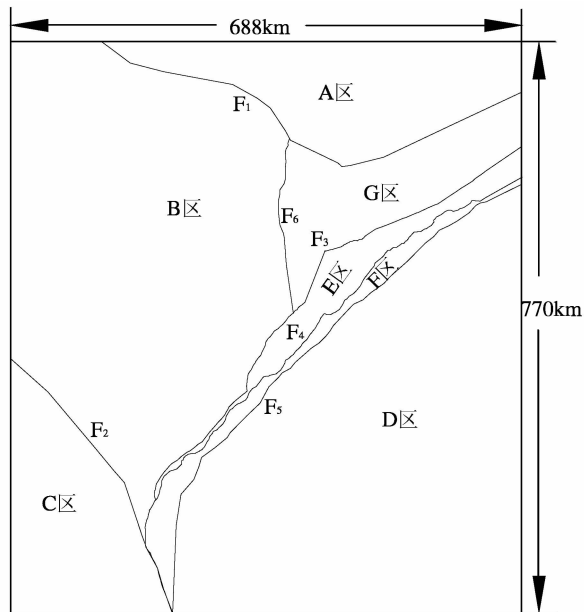


图1 地质模型

Fig. 1 Geological model

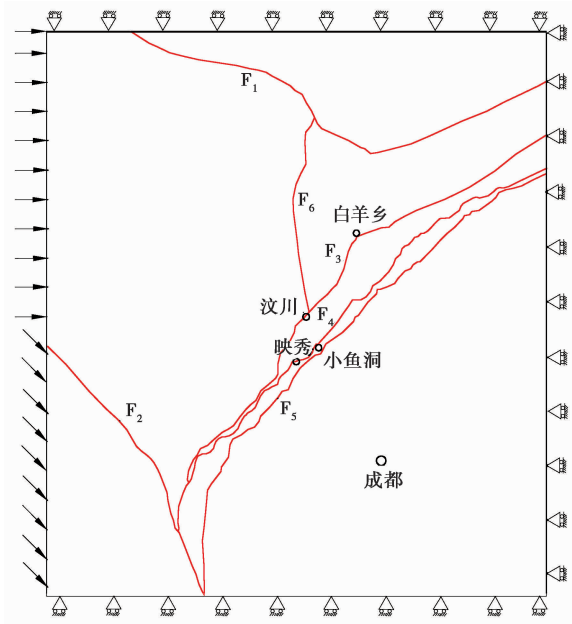


图2 模拟计算模型边界条件

Fig. 2 Boundary conditions of simulation model

4 材料参数及边界条件

4.1 材料参数

通过对研究区地层岩性(表1)的分析,参考前

表2 岩体材料参数

Table 2 Material parameters of rocks

区域	弹性模量/MPa		泊松比		容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$		黏聚力/MPa		摩擦角/($^{\circ}$)	
	地震前	地震时 地震后	地震前	地震时 地震后	地震前	地震时 地震后	地震前	地震时 地震后	地震前	地震时 地震后
A	35×10^3	30×10^3	0.24	0.24	27	27	1	0.9	40	37
B	30×10^3	25×10^3	0.24	0.24	26	26	1	0.9	40	40
C	23×10^3	18×10^3	0.24	0.24	26	26	9	0.8	45	45
D	40×10^3	12×10^3	0.23	0.23	27	27	5	1	35	41
E	10×10^3	8×10^3	0.26	0.26	26	26	0.9	0.7	35	35
F	12×10^3	7×10^3	0.26	0.26	26	26	0.8	0.8	34	34
G	28×10^3	25×10^3	0.24	0.24	26	26	1	0.7	38	35

表3 断层带材料参数

Table 3 Material parameters of fault zones

断裂 编号	法向刚度/ $\times 10^2 \text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$			切向刚度/ $\times 10^2 \text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$			黏聚力/MPa			摩擦角/($^{\circ}$)		
	地震前	地震时	地震后	地震前	地震时	地震后	地震前	地震时	地震后	地震前	地震时	地震后
F ₁	4	4	4	2	2	2	0.1	0.008	0.008	15	15	15
F ₂	4	4	4	1	1	1	1	0.008	0.008	23	23	23
F ₃	30	30	30	2	0.2	0.2	0.5	0.05	0.05	30	20	20
F ₄	30	3000	3	10	10	0.33	0.2	0.05	0	10	10	5
F ₅	300	3000	3000	334	334	334	0.5	0.2	0.1	25	25	25
F ₆	300	300	300	30	30	30	0.8	0.7	0.6	25	20	18

人研究过程中的地层岩性资料,确定本次数值模拟的岩体材料参数见表2。

本次模拟中断层力学参数的选取(表3)主要考虑了断裂的活动性的区域差异和汶川地震中震位

移的差异性。

地震使岩体原来承受的应力和宏观连续性等方面发生一定程度的变化。为了体现这些变化,在模拟地震时的位移与构造应力场时,将岩体和断层的物理力学参数做了部分调整(表2,3)。

在选取地震后的材料参数时,岩体的材料参数取和地震时相同的数值,对断裂的参数进行了改变。由于地震时龙门山中央断裂的错动和前山断裂的局部错动使断裂带岩体强度有所降低,所以,将龙门山中央断裂和龙门山前山断裂的参数减小,其他断裂的参数不变(表2,3)。

4.2 边界条件

根据区域应力构造应力场研究结果,在模型西侧边界鲜水河断裂以北的区域施加东西向构造应力,鲜水河断裂以南地区施加SE45°向的构造应力,模型东、南和北侧边界为约束边界(图2)。

5 模拟结果分析

5.1 地震前构造应力场模拟结果

选取殷跃平等^[11] GPS 监测数据中5个点进行位移拟合(表4)。

5.1.1 最大主应力

最大主应力以压应力为主,在断裂带局部拐点、端点和断裂的交汇点出现应力集中,特别是阿尼玛卿—略阳断裂与岷江断裂和龙门山断裂的交汇点以及龙门山断裂与鲜水河断裂的交汇点,且龙门断裂带的应力值明显大于其他地区(图3)。

最大主应力方向具有分区特点。在鲜水河断裂带北部地区和龙门山断裂带,主应力轴优势方向为东西向,这与谢富仁等^[10] 研究结果相符。但在岷江断裂与龙门山后山断裂之间的地区,主压应力轴优势方向为北东东向,龙门山前、后断裂之间和鲜水河断裂以西的地区,主压应力轴优势方向为北西向;

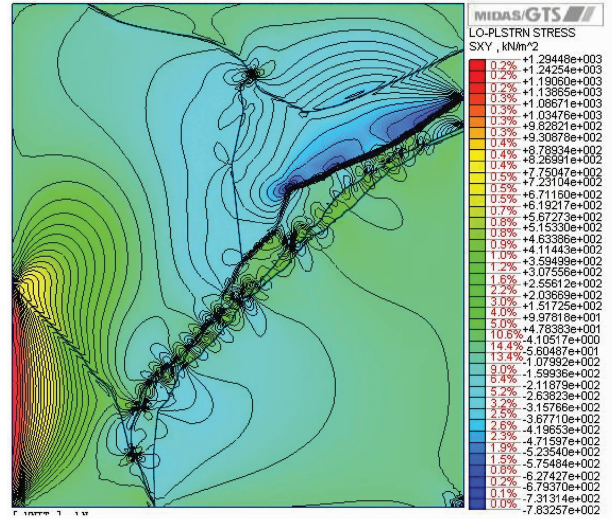


图3 地震前区域最大主应力等值线图

Fig. 3 Maximum principal stress isoline of pre-earthquake

在断裂带交汇处应力场比较复杂,龙门山后山断裂的主压应力轴优向方位在白羊乡附近开始转变,在其西南部则渐变为与断裂走向近垂直,而东北部则逐渐与断裂走向近平行。

龙门山前山断裂应力分布较均匀。龙门山后山和中央断裂最大主应力起伏较大,龙门山后山断裂的汶川和茂县附近地区的应力值最大量值约1.51MPa,龙门山中央断裂的映秀附近地区的应力值最大量值约1.72MPa。分析龙门山前山、中央和后山断裂最大主应力的量值可以看出,最大主应力最大值有明显差异,以龙门山中央断裂最大(1.72MPa),后山断裂次之(1.51MPa),前山断裂最小(小于1.5MPa)。

5.1.2 剪应力

龙门山断裂带的剪应力等值线变化梯度明显大于其他地区,且龙门山中央断裂、前山断裂和后山断裂相比,剪应力最大值以中央断裂为最大(879kPa),山前山断裂最小(184kPa),后山断裂居中(434kPa)。龙门山中央断裂以映秀附近区域的剪应力为最大,龙门山后山断裂以汶川、茂县附近的

表4 监测点模拟与实测位移值对比

Table 4 Comparison of measured and simulated displacement values before the Wenchuan earthquake

监测点*	东经/(°)	北纬/(°)	实测位移速率/mm·a ⁻¹	模拟位移速率/mm·a ⁻¹	误差/(%)	计算总位移/m
1	105.31	32.61	3.94	4.25	7.90	1.27368
2	102.08	31.45	10.95	10.45	-4.6	3.1364
3	103.73	32.40	6.16	6.93	12.5	2.08027
4	102.61	32.03	11.23	9.72	-13.4	2.91471
5	103.49	31.14	8.44	8.0	-5.2	2.38668

剪应力为最大。

表5 模拟值与实测位移值对比

Table 5 Comparison of measured and simulated displacement values when the Wenchuan earthquake occurred

监测点	东经/ (°)	北纬/ (°)	实测位移/ m	计算位移/ m	误差/ (%)
1	104.83	32.18	1.531	1.35036	-11.8
2	104.44	31.80	2.427	2.42606	0.4

5.2 地震时构造应力场模拟结果

对龙门山地区及邻区2个典型位移监测点资料进行拟合(表5)。

5.2.1 最大主应力

整个研究区域仍处于一种挤压状态。沿龙门山断裂带,应力场比较复杂,在中部区域主压应力轴优势方向与断裂带走向近于垂直,北部区域主压应力轴优势方向渐变为与断裂带走向近于平行,在南部区域,主压应力轴优势方向一部分与断裂带走向近于垂直,一部分与断裂带走向斜交。主压应力轴优势方向沿龙门山中央断裂,由西南至东北,呈现出近东西向→SEE向→近东西向的变化,上述变化规律与王勤彩等^[12]研究结果基本相符。

最大主应力的集中主要出现断裂局部拐点及交汇区,特别是龙门山断裂与鲜水河断裂的交汇区及其与岷江断裂交汇的区域,而且龙门山断裂带西南部的应力集中程度要比东北部大。

地震时龙门山断裂带西南部的最大主应力的变化程度比其他区域要大,其变化特征为:(1)在龙门山后山断裂西南部与B区交汇的区域,主压应力方向逆时针旋转近30°,由震前SE60°~80°变为NE83°~87°;(2)在E区的西南部(龙门山中央断裂与龙门山后山断裂交汇区域),主压应力方向由震前与断裂走向方向近垂直变为近东西方向。

与地震前相比,地震时最大主应力方向发生了偏转,其中在三江乡的西部、卧龙镇的东南部之间(位于龙门山中央断裂),由地震前与断裂走向垂直变为震后与断裂走向平行;而在的汶川附近(位于龙门山后山断裂),由震前与断裂近于垂直变为震后与断裂近于平行。

龙门山前山断裂的最大主应力量值西南段大于东北段,但总体沿断裂走向变化幅度较小。龙门山中央断裂的最大主应力值在映秀附近区域最大,量值约为1.87MPa。龙门山后山断裂的最大主应力值

总体是中部区域大,西南部的区域次之,东北部的区域最小,最大值出现在茂县以北的区域量值约为1.76MPa。

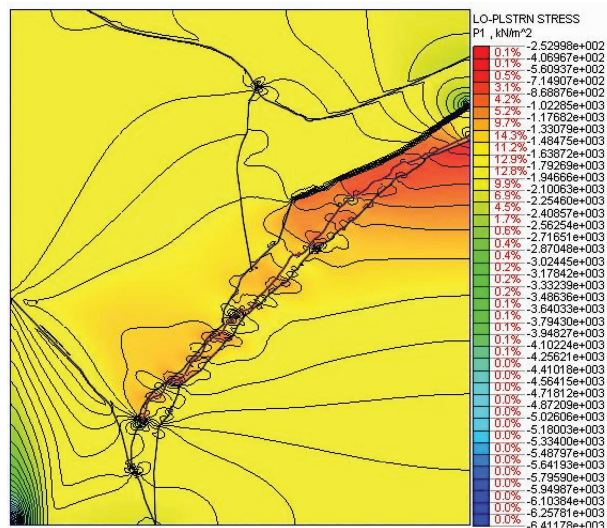


图4 地震后区域最大剪应力等值线图

Fig. 4 Maximum shear stress isoline of post-earthquake

5.2.2 剪应力

剪应力集中现象出现的区域与震前基本一致,但是剪应力等值线的梯度变化有所不同,主要表现在:(1)剪应力在地震时变化梯度明显,在龙门山后山、中央断裂之间的剪应力等值线较地震前密集;(2)白羊乡附近区域(位于龙门山后山断裂)剪应力明显集中,且剪应力变化梯度较地震前明显增大;(3)剪应力等值线在岷江断裂与阿尼玛卿—略阳断裂交汇处也较地震前更加密集。

龙门山中央断裂以映秀附近区域剪应力值为最大,约为804kPa,而其余地段则在100~200kPa之间变化。前山断裂的剪应力值在都江堰市附近区域最大,约为249kPa,其他区域剪应力值在100~200kPa之间变化较小。后山断裂剪应力值在白羊乡附近区域最大,量值约为528kPa。

5.3 地震后构造应力场模拟结果

5.3.1 最大主应力

研究区最大主应力方向总体呈NEE至SEE,但在龙门山后山断裂西南区域,由震时的NE83°~87°渐变为地震后的SE83°~87°,其中部区域最复杂,最大主应力方向部分与断裂走向垂直,部分与断裂走向斜交,部分与断裂走向平行;断裂东北区域最大主应力方向与震时基本一致。龙门山中央断裂地震后最大主应力在其西南段表现为由震时的与断裂

走向近于平行偏转为震后的 SEE 向; 在龙门山前山断裂的中部小鱼洞断裂以北最大主应力方向为 NEE 向, 在其以南最大主应力方向为南东向。

研究最大主应力监测曲线图, 表明龙门山前山断裂除在断裂的交汇点和端点附近区域出现应力峰值和变化较大外, 在断裂走向方向上应力逐渐变小, 与震时应力曲线相比平缓一些; 龙门山中央断裂的应力曲线呈波浪起伏状, 最大值出现在映秀东北侧; 龙门山后山断裂最大应力值沿断裂向东北方向转移, 并没有在汶川、茂县附近区域出现。

5.3.2 剪应力

地震后, 在龙门山中央断裂的映秀附近区域, 未出现地震前那样的剪应力等值线密集区, 但在其东北部出现应力集中现象 (图 4); 在龙门山后山断裂的白羊乡附近区域, 应力变化明显, 有剪应力的集中区出现, 与震前相比, 应力变化梯度增大。在平武附近也出现剪应力集中区。

龙门山前山断裂的最南部出现剪应力最大值, 中央断裂剪应力的最大值出现在北川附近区域。龙门山后山断裂的在白羊乡附近区域出现剪应力的最大值。

6 构造应力场变化规律

分别对地震前、地震时和地震后三种模拟工况下的构造应力场结果进行分析, 发现地震前→地震时→地震后的构造应力不仅在量值上有所变化, 而且方向上也有所改变, 通过研究发现最大主应力有下列一些变化规律:

(1) 整个研究区域在震前、震时和震后, 最大主应力除在局部地区应力方向发生变化外, 其他地区大体上呈 NEE 到 SEE 向。

(2) 龙门山后山断裂的西南地区, 最大主应力方向由最初震前的 $SE60^\circ \sim 80^\circ$ 变为震时的 $NE83^\circ \sim 87^\circ$, 最后变为地震后的 $SE83^\circ \sim 87^\circ$ 向 (图 5a)。

(3) 龙门山后山断裂中部地区最大主应力方向呈现近于垂直断裂走向→震时近于平行断裂走向→震后与震时近于一致的变化 (图 5b)。

(4) 龙门山中央断裂的映秀附近地区, 最大主应力方向由最初地震前的 $SE40^\circ \sim 50^\circ$ 变为震时的 $NE70^\circ \sim 80^\circ$ 方向, 到地震后又变为 $NE40^\circ \sim 50^\circ$ (图 5c、图 6)。

(5) 在小鱼洞 (龙门山前山断裂和中央之间) 地区, 最大主应力方向由震前的 $SE60^\circ \sim 70^\circ$ 变为震时

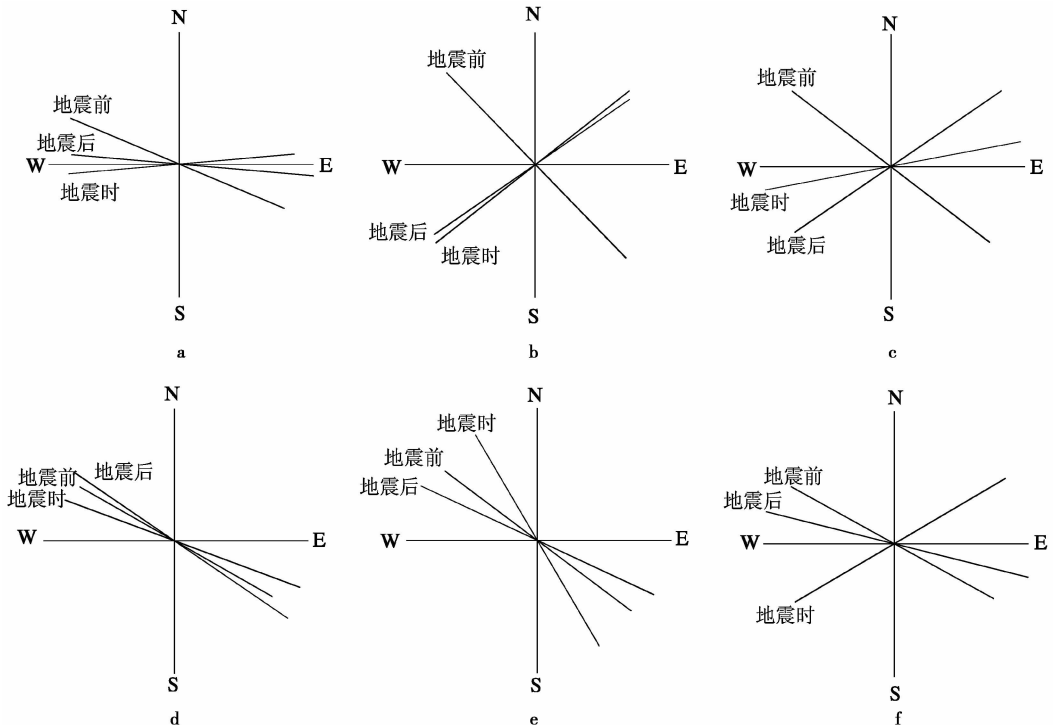


图 5 地震前、地震时和地震后的最大主应力方向的变化

Fig. 5 Changes of maximum principal stress direction of pre-earthquake, earthquake and post-earthquake

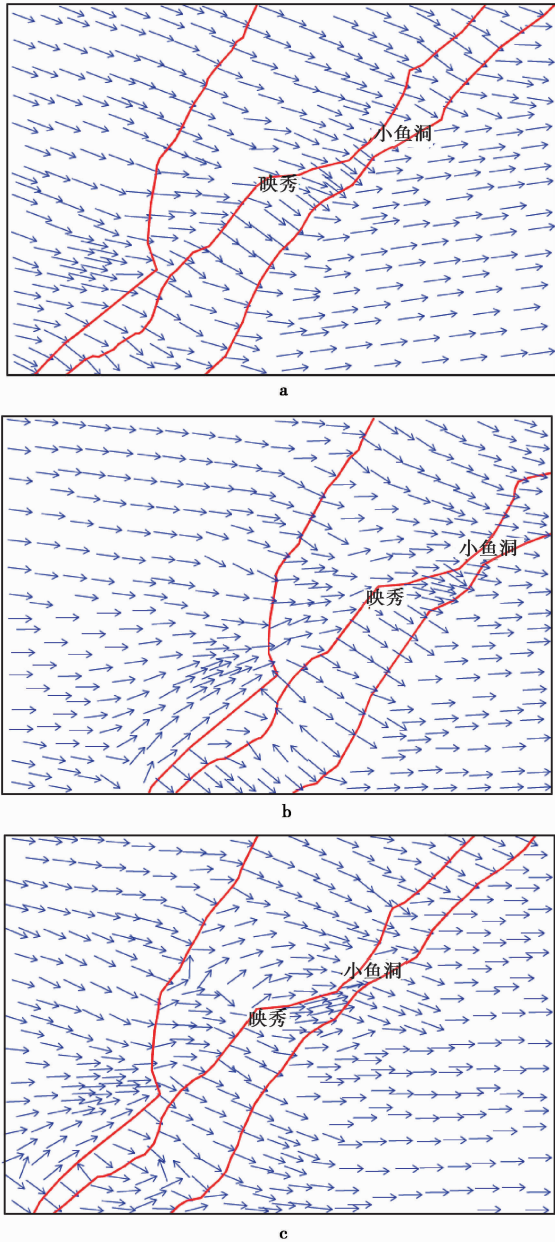


图6 地震前(a)、地震时(b)和地震后(c)后映秀附近最大主应力矢量图

Fig. 6 Maximum principal stress vectors of pre-earthquake (a), earthquake (b) and post-earthquake (c) near Yingxiu

的 $SE70^{\circ} \sim 80^{\circ}$, 地震后应力方向最后变为的 $SE40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。地震后应力方向在小鱼洞断裂附近区域, 发生分叉, 应力方向在其以北为 NEE 向, 以南为南东向 (图 5d、图 6)。

(6) 在光明乡 (龙门山后山断裂) 与清平乡 (中央断裂) 之间的地区, 最大主应力方向由最初的 $SE50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 变为震时的 $NW20^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 地震后应力方向最后变为 $SE60^{\circ} \sim 75^{\circ}$ (图 5e、图 7)。

(7) 在北川西部地区, 呈现 $SE55^{\circ} \sim 60^{\circ} \rightarrow$

$NE50^{\circ} \sim 60^{\circ} \rightarrow SE70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的变化 (图 5f)。

(8) 在龙门山后山断裂东北部与阿尼玛卿—略阳断裂之间的地区, 最大主应力矢量在地震前、后以及地震时变化较小, 应力矢量方向大体与断裂走向平行。

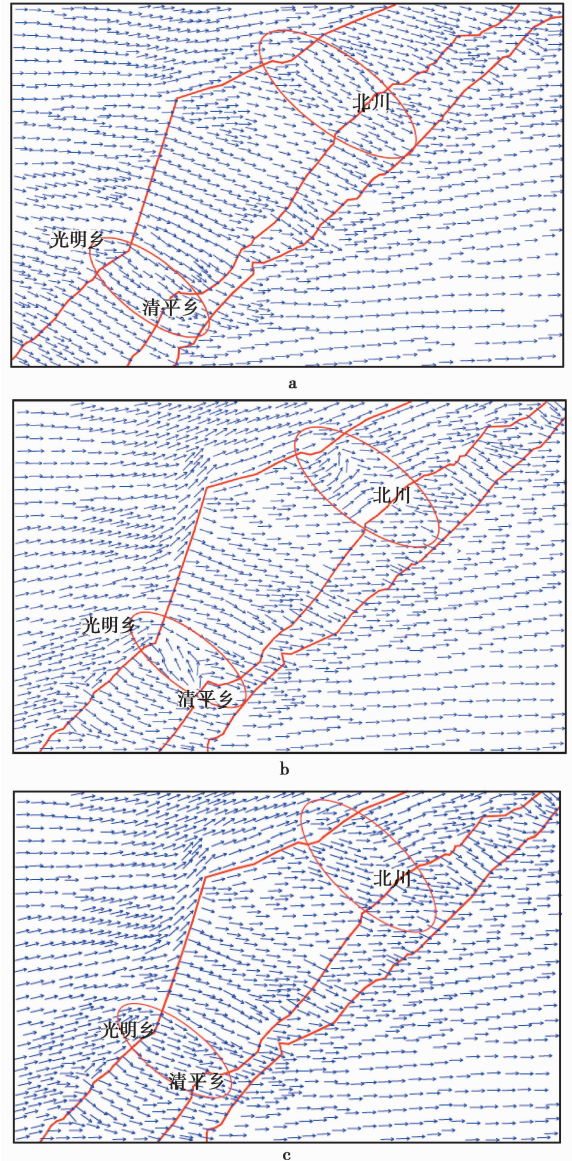


图7 地震前(a)、地震时(b)和地震后(c)后北川附近最大主应力矢量图

Fig. 7 Maximum principal stress vectors of pre-earthquake (a), earthquake (b) and post-earthquake (c) near Beichuan

从模拟结果还可以看出, 龙门山断裂带剪应力从地震前→地震时→地震后的变化规律为:

(1) 从地震前→地震时→地震后, 剪应力集中区域在发生变化, 尤以映秀附近最为突出, 其地震前和地震时剪应力明显集中, 而在地震后未见剪应力集中; 地震后, 剪应力值在龙门山中央断裂和前山

断裂上明显减小,但在后山断裂上有所增大。

(2)汶川地震后剪应力集中区在龙门山中央断裂上向东北地区转移,映秀附近地区这种现象表现最明显,这一规律与汶川地震的余震主要集中在龙门山断裂带的东北部的规律一致。

7 结 论

通过系统的数值模拟,揭示了龙门山地区在汶川地震发生前、发生时和发生后的构造应力场的演变规律。模拟结果表明:

(1)龙门山地区在汶川地震到地震时到地震后的最大主应力和剪应力的数值和方向均发生了改变,从地震前到地震时到地震后,研究区的最大主应力方向整体上由 NEE 变为 SEE,只是在局部地区应力场的变化有所不同,但在不同地区这种变化表现有所差异,尤其是最大主应力的方向。

(2)龙门山地区的剪应力从地震前到地震时和地震后的变化规律为:在震前和震时均有局部区域出现了剪应力集中的现象,特别是在映秀附近这种现象特别突出;然而在地震后,区域内剪应力相对均匀分布,而且与地震前相比,剪应力在龙门山前山断裂和龙门山中央断裂分布的值明显减小,但是在龙门山后山断裂附近分布的剪应力数值增大。同时地震后剪应力在龙门山中央断裂上集中的区域逐渐向东北方向移动,特别是在映秀附近最为明显。

参 考 文 献

- [1] 安欧. 构造应力场[M]. 北京:地震出版社,1992.
An Ou. Tectonic stress field. Beijing: Seismological Press,1992.
- [2] 陈国光, 计凤桔, 周荣军, 等. 龙门山断裂带晚第四纪活动性分段的初步研究[J]. 地震地质, 2007, **29**(3): 657 ~ 673.
Chen Guoguang, Ji Fengju, Zhou Rongjun, et al. Primary research of activity segmentation of Longmenshan fault zone since late-Quaternary. Seismology and Geology, 2007, **29**(3): 657 ~ 673.
- [3] 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, **26**(2): 389 ~ 403.
Deng Qidong, Chen Shefa, Zhao Xiaolin. Tectonics, seismicity and dynamics of Longmenshan Mountains and its adjacent regions. Seismology and Geology, 1994, **26**(2) 389 ~ 403.
- [4] 蒋靖祥, 尹光华, 许凤柱. 昆仑山口西 8.1 级地震前库尔勘测区相对应力场变化[J]. 地震, 2003, **23**(3): 89 ~ 96.
Jiang Jingxiang, Yin Guanghua, Xu Fengzhu. Relative stress field change of Kuerle region before 8.1 earthquake in western Kunlun Pass. Earthquake, 2003, **23**(3): 89 ~ 96.
- [5] 李勇, 周荣军, Densmore AL, 等. 青藏高原东缘大陆动力学过程与地质响应[M]. 北京:地质出版社, 2006, 1 ~ 134.
Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A. L, et al. The Eastern Margin of Continental Dynamics Process and Geological Response. Beijing: Geological Publishing House, 2006, 1 ~ 134.
- [6] 龙海英, 高国英, 聂晓红. 1997 ~ 1998 年伽师强震群震源区应力场特征[J]. 西北地震学报, 2007, **29**(2): 145 ~ 149.
Long Haiying, Gao Guoying, Nie Xiaohong. Characteristics of stress field in the focal region of Jiashi strong earthquake swarm from 1997 to 1998. Northwestern Seismological Journal, 2007, **29**(2): 145 ~ 149.
- [7] 唐荣昌, 韩渭宾. 四川活动断裂与地震[M]. 北京:地震出版社, 1993.
Tang Rongchang, Han Weibing (Eds). Active Faults and Earthquakes in Sichuan Province. Beijing: Seismological Press, 1993.
- [8] 屠泓为, 万秀红, 高歌, 等. 1977 ~ 2006 年新疆伽师地震断层性质及应力场变化原因初探[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(4): 1038 ~ 1044.
Tu Hongwei, Wan Xiuhong, Gao Ge, et al. Research of the reason for variations of the earthquake fault characters and the stress field in the Jiashi region of Xingjing from 1977 to 2006. Progress in Geophysics, 2008, **23**(4): 1038 ~ 1044.
- [9] 王凯英, 马瑾, 顾国华. 1996 年川滇地区发生的一次应力转向事件[J]. 地学前缘, 2003, **10**(特刊): 233 ~ 239.
Wang Kaiying, Ma Jin, Gu Guohua. Rotation of stress axis in Sichuan-Yunnan region in 1996. Earth Science Frontiers, 2003, **10**: 233 ~ 239.
- [10] 王勤彩, 陈章立, 郑斯华. 汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征[J]. 科学通报, 2008, **53**(16): 2348 ~ 2354.
Wang Qincai, Chen Zhangli, Zheng Sihua. Wenchuan earthquake aftershock sequence focal mechanism of space segmentation. Chinese science bulletin, 2008, **53**(16): 2348 ~ 2354.
- [11] 谢富仁, 陈群策, 崔效锋, 等. 中国大陆地壳应力环境研究[M]. 北京:地质出版社, 2003.
Xie Furen, Chen Qunce, Cui Xiaofeng, et al. Research of Mainland China Crustal Stress Environment. Beijing: Geological Publishing House, 2003.
- [12] 殷跃平, 潘桂棠, 刘宇平, 等. 汶川地震地质与滑坡灾害概论[M]. 北京:地质出版社, 2009.
Yin Yueping, Pan Guitang, Liu Yuping, et al. Geology and Landslide Disaster of the Wenchuan Earthquake. Beijing: Geological Publishing House, 2009.