

文章编号: 0253-3782(2005)02-0163-08

用(DDA+FEM)方法数值模拟 1975 年 海城、1999 年岫岩地震发生的过程^{*}

张瑞青¹⁾ 魏富胜¹⁾ 乔成斌²⁾ 林邦慧¹⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100039 中国地震应急搜救中心

摘要 用非连续变形分析方法(DDA+FEM),数值模拟了华北地区各地块相互制约构造环境中发生的 1975 年海城地震及 1999 年岫岩地震的过程. 通过对岫岩前震及近期余震分布图象的研究,以及前人对海城地震的研究,提出了海城、岫岩地震发震构造块体模型. 数值模拟结果给出了两次地震释放的主应力变化、最大剪应力变化等值线图,地震前后位移变化矢量图,及发震断层滑移随时间的变化,分别与相应地震的震源机制、宏观等震线、发震断层的走滑性质等的结果基本一致.

关键词 非连续变形分析方法 数值模拟 地震破裂过程

中图分类号: P315.8 **文献标识码**: A

引言

1999 年 11 月 29 日岫岩地震($M_s 5.4$)发生在 1975 年海城地震($M_s 7.3$)北西西向余震分布的南东端外侧孤山镇与岫岩县偏岭镇之间,其地震序列的特点与海城地震很相似,均属于前震活动非常频繁的地震序列. 其主震的震源机制与海城主震很相像,发震断层的走向基本一致. 研究这类地震发生的过程对深化地震成因认识及发展地震预测理论具有重要的意义.

1988 年美国加州大学石根华教授提出的非连续变形方法(Discontinuous Deformation Analysis, 简称 DDA),是一个分析断层地块系统力与位移相互作用的工具. 它可以计算块体系统在动力和静力作用下,块体的滑移及不连续介质的变形,求解每个块体的运动方式和动力学行为(石根华, 1997; Shi, Goodman, 1988). 它克服了有限元方法(Finite Element Method, 简称 FEM)只能研究一个连续体内破裂前状态的局限性. 近年来非连续变形分析方法得到了多种应用. Liu(1999)用该方法数值模拟了华北地区断层的滑移和块体变形. 蔡永恩等(1999)用 LDDA 方法,模拟了唐山地震震源的动力学过程. 白武明等(2003)用(DDA+FEM)方法,数值模拟了 1976 年唐山大震发生对华北地区各地块运动变形的影响. 陈祖安等(2003)用(DDA+FEM)方法,对华北 1966 年以来的一系列 7 级大震震源破裂过程进行了数值模拟,表明用 DDA 方法数值模拟块体的相互作用下强震发生的

^{*} 国家自然科学基金项目(40174011, 40274029)资助. 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1008.
2003-10-20 收到初稿, 2004-08-26 收到最后修改稿, 2004-09-17 决定采用.

过程比较有效.

本文利用重新定位后的岫岩地震目录资料(陈学忠等, 2001), 通过对前震及近期余震分布图象的研究, 推测发震构造细结构, 并利用 CDSN 及辽宁数字化台网数字化资料, 研究了岫岩主震的破裂过程. 在这些结果及已有的海城地震研究(林邦慧等, 1979, 1989)的基础上, 提出了海城、岫岩地震发震构造块体模型; 并在几大板块相互作用的背景下, 在我国华北地区各地块相互制约的构造环境中, 用二维(DDA+FEM)方法, 初步数值模拟了海城、岫岩地震发生的破裂过程, 为进一步探讨海城、岫岩地震的发生, 对华北地区各地块运动变形和边界应力状态的影响, 以及为这类强震的发震机理研究打好基础.

1 模型

为研究海城、岫岩强震发生对华北地区各地块运动变形及边界应力状态的影响, 本文选取华北为研究地区. 根据邓起东和范福田(1980)对该地区的研究成果, 以及该地区活动构造带分布、强震活动分布、宏观等震线的分布图象和震源过程的结果等资料, 参考“973”项目《大陆强震机理与预测》子课题的研究结果^①, 将华北地区划分成 11 个较大的地块, 模型如图 1a. 图 1b 所示的海城、岫岩地震发震断层地块二维模型, 主要根据以下 3 点绘制而成: ① 海城、岫岩地震前震、早期余震分布图象(图 2a, b; 朱凤鸣, 吴戈, 1978; 陈学忠等, 2001); ② 1975 年海城大震北西-南东走向的前震破裂带形成后, 经过几小时平静后在其南面约 6 km 处发生海城主震, 主破裂方向为北西西向(林邦慧等, 1979, Ciper, 1979); ③ 1999 年岫岩地震发生在 1975 年海城大震发震断层南东端外约十余公里附近. 前震破裂带为北东走向分布, 主震发震断层没落在前震破裂带上, 其走向为北西西走向.

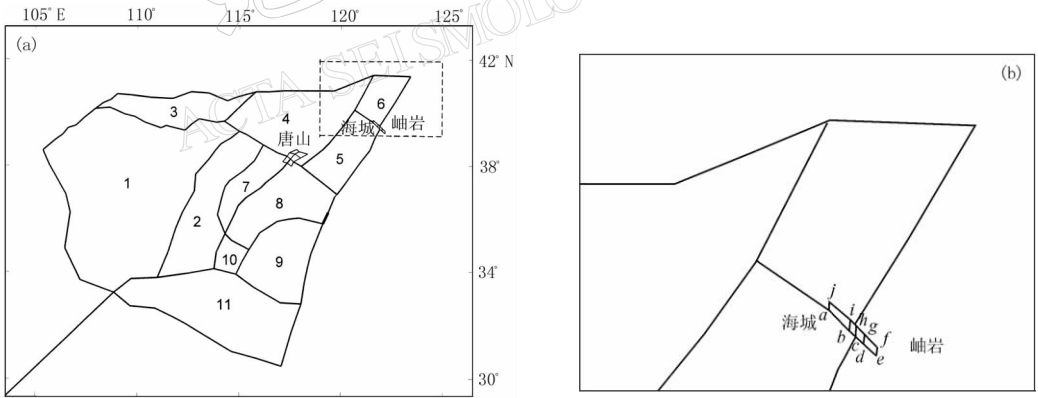


图 1 华北地区块体模型

(a) 华北地区块体模型. 1. 鄂尔多斯地块, 2. 太行山地块, 3. 阴山, 4. 燕山, 5. 辽东湾, 6. 下辽河, 7. 冀中凹陷, 8. 黄骅-渤海凹陷, 9. 鲁西隆起, 10. 内黄隆起, 11. 河淮地块; (b) 海城、岫岩地震发震断层块体模型. 图中线段: ac 为海城主震发震断层, ih 为海城前震破裂带, de 为岫岩主震发震断层, dg 为岫岩前震破裂带, cd 为闭锁段

整个华北地区模型由 33 个大小不同的块体及 410 个网格组成. 为了减小边界对计算结果的影响, 本文把整个模型嵌在一个大的弹性块体中, 采用莫尔库仑破裂准则, 给定位

① 白武明. 2000. 《华北平原活动地块边界断层与鄂尔多斯地块周边强震活动动力学过程的数值模拟》进展报告.

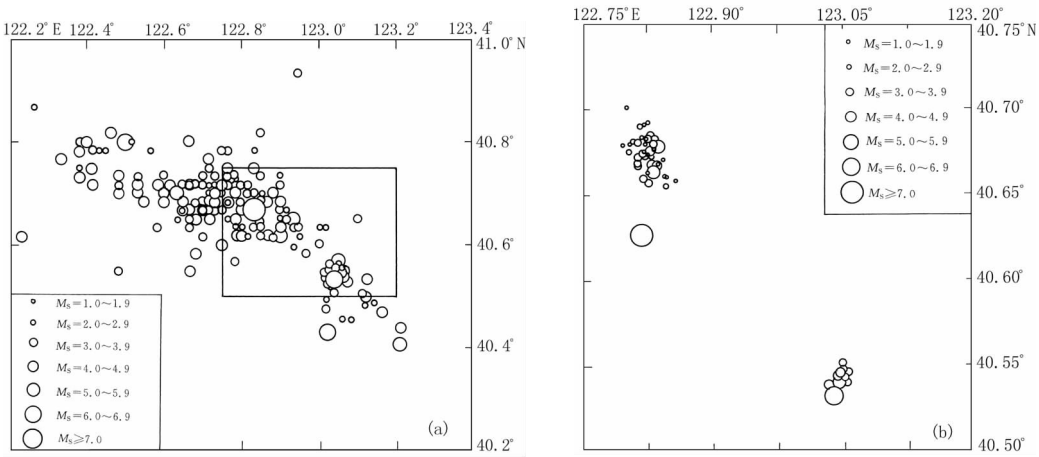


图 2 1975 年海城地震与 1999 年岫岩地震前、主、余震分布图

(a) 1975 海城与 1999 岫岩主震与早期余震相对位置；(b) 1975 海城与 1999 岫岩前震与主震相对位置

移速率边界条件. 边界位移速率值参考 Shen 等(2000)用 GPS 资料得到的相应地区的位移速率结果. 其动力计算的时间步长为 1 s, 计算总时间为 20 s.

计算中地块边界断层的危险因子 G 定义为

$$G = \frac{\tau}{\sigma_n \tan \phi} \tag{1}$$

式中, τ 是沿断层面的剪切应力, σ_n 是断层面的法向应力, ϕ 是摩擦角.

当 $G > 1$ 时块体的边界断层局部滑动, 当 $G < 1$ 时断层不滑动, 当 G 接近 1 时, 断层处于危险状态.

2 用(DDA+FEM)方法数值模拟海城、岫岩地震的破裂过程

本文尝试在华北地区各地块相互制约的构造环境中, 用(DDA+FEM)方法数值模拟海城及岫岩地震的破裂过程. 在模型的边界上加载位移速率边界条件, 计算初始应力场及初始位移速率场. 通过反复尝试, 获得一组参数, 使得当附加一个小扰动, 在海城及岫岩地震的发震断层上依次满足莫尔库仑破裂定律, 使得以发震断层为接触边的小块体沿该接触边发生滑动, 依次发生海城、岫岩地震. 依次计算研究区多种分布图, 并分别显示海城及岫岩地震邻近地区的结果与已有结果的对比图, 包括: ① 大震释放的主应力场分布图与震源机制对比图; ② 大震前后最大剪应力变化等值线图与宏观等震线对比图; ③ 大震发生前后位移变化矢量场; ④ 发震断层滑移随时间的变化图与震源时间函数. 并计算出一些震源参数, 如最大走滑错距、应力降等.

2.1 研究区域的初始应力场与初始位移速率场

图 3a 是计算得到的华北地区的主应力分布图, 基本上均为北东东方向, 总体趋势与许忠准等(1989)用大量震源机制结果推断的华北地区构造应力场结果较为一致.

图 3b 是计算得到的华北地区位移速率矢量分布图, 可看出位移速率矢量的方向比较一致, 均为南东东方向, 结果与 Shen 等(2000)用 GPS 资料得到的东亚地区位移速率矢量分布图中相应地区的结果基本一致.

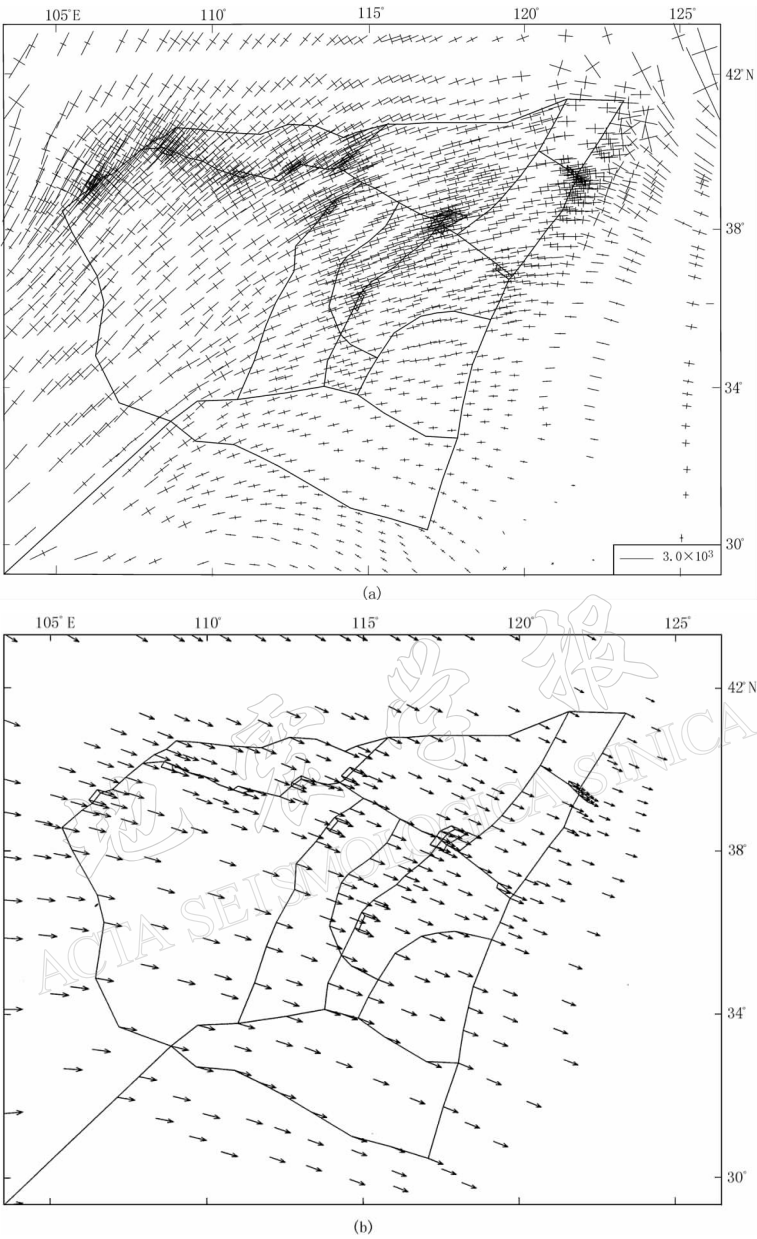


图 3 计算得到的研究区初始主应力分布图(a)及初始位移速率矢量分布图(b)

以上结果使得在进一步对海城、岫岩地震的数值模拟能基本上约束在华北地区的应力场及位移场的环境中进行。

2.2 海城地震发生过程的数值模拟

图 4a₁ 是计算得到的海城地震释放的主应力场变化图，图中显示在东北—南西方位为主压应力减少区，与顾浩鼎等(1976)给出的震源机制解(图 4a₂)中 P 波初动方向向下的区域一致。在南东方向为主压应力增加区，与震源机制解 P 波初动方向向上的区域基本一致。图 4b₁ 是地震发生前后最大剪应力变化等值线图，图中显示等值线图的极震区总体走

向为北西西, 与宏观等震线图 4b₂ (朱凤鸣等, 1978) 中极震区的走向基本一致. 图 4c 是地震发生前后位移变化矢量图, 从图中可以看出, 震中区位移变化最大, 并向四周衰减. 海城地震发生了左旋走滑错动并明显波及到唐山地震区及岫岩地震孕震区, 显示了对唐山地震区特别是岫岩地震孕震区的变形有影响. 图 4d 显示了计算得到的海城地震发震断层滑移随时间的变化. 计算得到海城大震最大走滑错距约为 0.15 m, 应力降为 1.6 MPa.

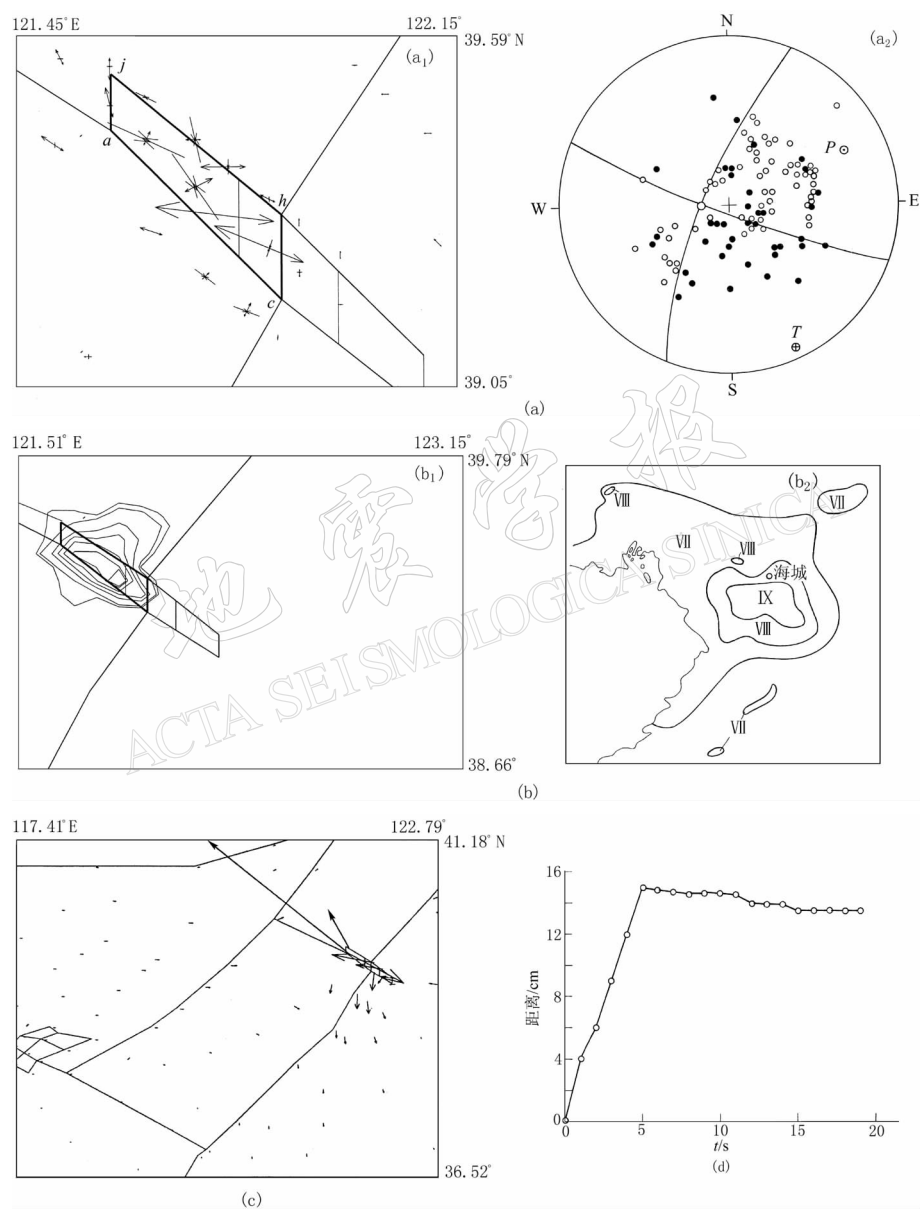


图 4 1975 年海城地震数值模拟计算结果对比图
(a) 应力场变化(a₁)与震源机制(a₂); (b) 最大剪应力变化等值线图(b₁)与宏观等震线图(b₂);
(c) 地震前后位移变化矢量图; (d) 发震断层滑移随时间变化

2.3 岫岩地震发生过程的数值模拟

图 5a₁ 是计算得到的岫岩地震释放的主应力变化图, 图中同样显示在北西方位为主压应力增加区, 与该震震源机制的结果图 5a₂(张萍, 蒋秀琴, 2001)中 P 波初动方向向上的区域基本一致. 在北东-南西方位上为主压应力减小区, 与该震震源机制解中 P 波初动方向向下的区域也基本一致. 图 5b₁ 是地震发生前后最大剪应力变化等值线图. 图中显示等值线图呈菱形状分布, 与宏观等震线图 5b₂(张群等, 2001)中较大烈度区(包括极震区)的分布

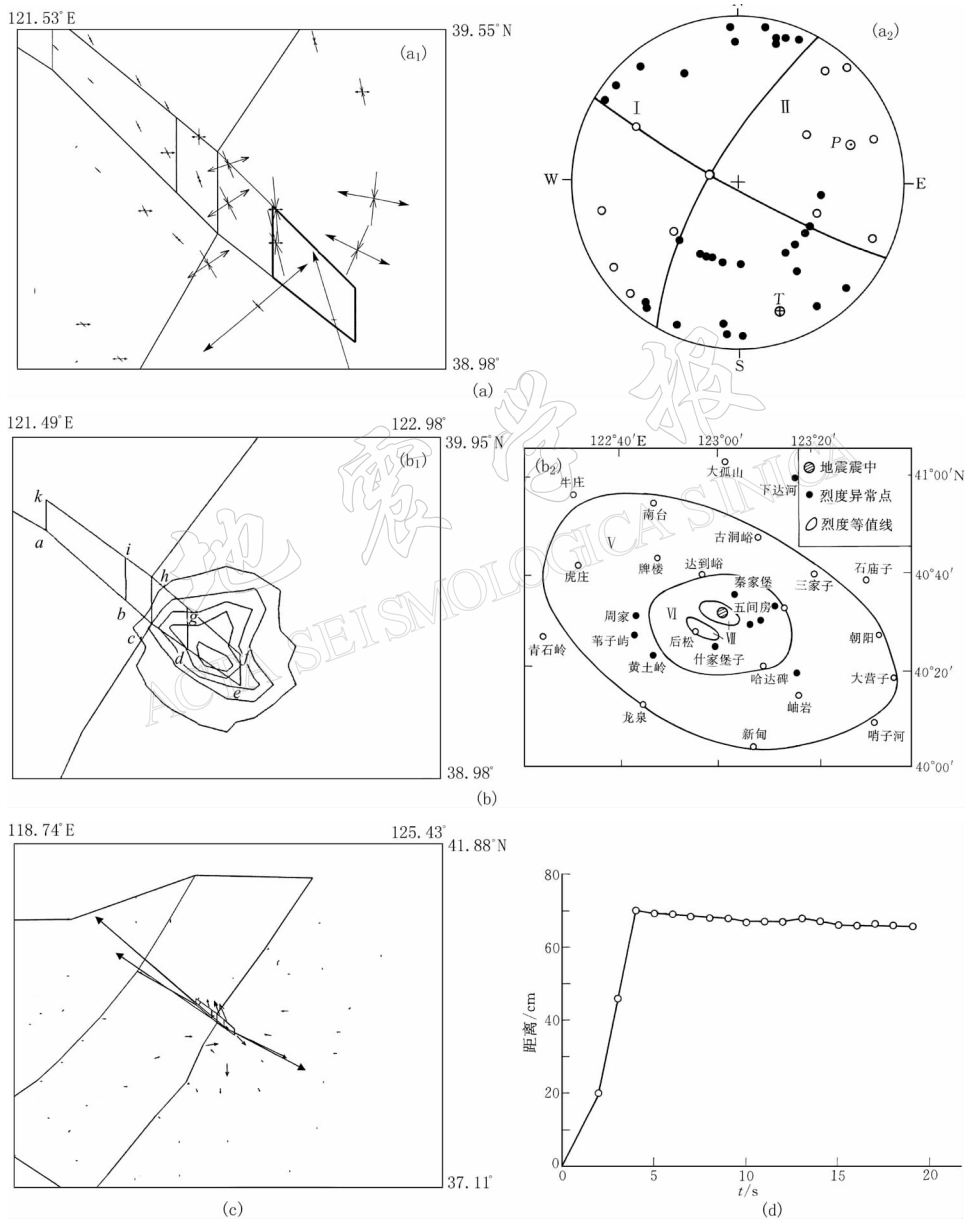


图 5 1999 年岫岩地震数值模拟计算结果对比图
(a) 应力场变化(a₁)与震源机制(a₂); (b) 最大剪应力变化等值线图(b₁)与宏观等震线图(b₂);
(c) 地震前后位移变化矢量图; (d) 发震断层滑移随时间变化

形状基本一致. 图 5c 是地震发生前后位移变化矢量图, 从图中可以看出, 岫岩地震也属于左旋走滑性质. 图 5d 显示了计算得到的岫岩地震发震断层滑移随时间的变化. 计算得到最大走滑错距约为 0.7 m, 应力降为 1.9 MPa.

3 讨论与结论

用非连续变形分析方法(DDA+FEM), 在华北地区各地块相互制约的环境中, 对海城、岫岩地震的破裂过程进行的数值模拟结果表明:

1) 计算得到华北地区初始位移场及初始应力场的一致性均较好, 位移和最大主压应力轴分别为南东东方向和北东东—南西西方向. 与用 GPS 资料获得的该区位移速率矢量场, 及用大量震源机制资料推断的华北地区构造应力场结果基本一致. 以上表明, 受印度洋板块、欧亚板块及太平洋板块所夹持的华北地区的应力场及位移场, 主要受印度洋板块所控制, 受太平洋板块的影响较弱.

2) 计算得到海城及岫岩地震释放的主压应力图象、最大剪应力变化等值线图、地震前后位移变化矢量图、发震断层滑移随时间的变化, 与相应地震的震源机制、宏观等震线图象、该震震源时间函数基本一致. 表明本文提出的模型基本可行, 用(DDA+FEM)方法能够较好地模拟两地震的破裂过程.

3) 计算得到的海城、岫岩地震震源机制的主压应力轴均为北东东向, 与大华北整体构造应力场的走向基本一致, 表明这些地震的发生均受华北地区大的构造应力场所控制.

4) 1975 年海城地震是在北西西走向发震断层上发生的不对称双侧破裂过程. 主破裂方向为北西西向. 朝南东东方向的破裂因受阻于南东东端部的障碍体, 这个方向的破裂长度较小, 由计算结果可知, 对其南东东端外侧的岫岩孕震区的变形及应变能的积累有促进作用. 对于接近破裂临界状态的岫岩发震断层的失稳可能起到加速的作用. 本文的结果为我们进一步半定量地研究海城、岫岩地震的发生, 对华北地区各地块运动变形和边界应力状态的影响, 以及海城、岫岩地震前震破裂带的形成对主震发震断层运动变形及应力状态的影响打好基础.

陈学忠研究员为本文提供了重新定位后的岫岩地震目录资料, 审稿专家及白武明研究员、陈祖安博士为本文提出了非常好地指导意见, 在此一并表示感谢.

参 考 文 献

- 白武明, 林邦慧, 陈祖安. 2003. 1976 年唐山大震发生对华北地区各地块运动与变形影响的数值模拟研究[J]. 中国科学, D 辑, 33(增刊): 99~107
- 蔡永恩, 何涛, 王仁. 1999. 1976 年唐山地震震源动力学过程的数值模拟[J]. 地震学报, 21(5): 469~477
- 陈学忠, 盖增喜, 周仕勇, 等. 2001. 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震序列的破裂过程研究[J]. 地震学报, 23(6): 659~662
- 陈祖安, 白武明, 林邦慧, 等. 2003. 1966 年以来华北地区一系列七极大震破裂过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, 46(3): 373~282
- 邓起东, 范福田. 1980. 华北地区新生代、现代地质构造特征, 华北地区的形成与发展[M]. 北京: 科学出版社, 192~205
- 顾浩鼎, 陈运泰, 高祥林, 等. 1976. 1975 年 2 月 4 日辽宁省海城地震的震源机制[J]. 地球物理学报, 19(4): 270~284
- 朱凤鸣, 吴戈等. 1978. 海城地震[M]. 北京: 地震出版社, 115~116

- 林邦慧, 陈运泰, 魏富胜. 1979. 不对称双侧破裂过程的研究及其在海城地震的应用[J]. 地震学报, **1**(2): 133~149
- 林邦慧, 白武明, 周冉. 1989. 1975 年海城地震序列发生过程的数值模拟[A]. 中国地球物理学学会编辑委员会编. 八十年代中国地球物理学进展[C]. 北京: 学术书刊出版社, 73~82
- 石根华. 1997. 《数值流形方法与非连续变形分析》. 北京: 清华大学出版社, 92~96
- 许忠淮, 汪素云, 黄雨蕊, 等. 1989. 由大量的地震资料推断我国大陆构造应力场[J]. 地球物理学报, **32**(6): 636~647
- 张萍, 蒋秀琴. 2001. 岫岩-海城 $M_s 5.4$ 地震序列的震源机制解及应力场的情况[J]. 地震地磁观测与研究, **22**(3): 76~82
- 张群, 潘科, 张海莹, 等. 2001. 岫岩-海城 $M_s 5.4$ 地震序列空间分布特征的探讨[J]. 地震地磁观测与研究, **22**(3): 83~91
- Cipar J. 1979. Source precesses of the Haicheng China earthquake from observations of the P and S waves[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **69**: 1 903~1 916
- Liu Lanbo. 1999. Modeling aseismic fault slip and block deformation in northern China by DDA[A]. *Proceedings of the First International Forum on DDA and Simulation of Discontinuous Media*[C]. Berkley, California, 373~382
- Shi G. 1988. *Discontinuous Deformation Analysis: A New Method for Computing Stress, Strain, and Sliding of Block System*[D]: [Ph D thesis]. University of California, Berkley, 381~393
- Shen Zhengkang, Zhao Chengkun, An Yin, et al. 2000. Contemporary crustal deformation in east Asia constrained by Global Position System measurements[J]. *J Geophys Res*, **105**(3): 5721~5734

NUMERICAL SIMULATION FOR 1975 HAICHENG AND 1999 XIUYAN EARTHQUAKE PROCESSES BY DDA+FEM

Zhang Ruiqing¹⁾ Wei Fusheng¹⁾ Qiao Chengbin²⁾ Lin Banghui¹⁾

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

2) China Center for Earthquake Disaster Emergency and SAR, Beijing 100049, China

Abstract: In this paper, using discontinuous deformation analysis, we simulate numerically the processes of the 1975 Haicheng earthquake and the 1999 Xiuyan earthquake in the tectonic environment of North China where blocks restrict each other by DDA+FEM. Based on the research on the distribution of foreshocks and recent aftershocks of Xiuyan earthquake and the results from study of Haicheng earthquake, we present a tectonic block model of Haicheng and Xiuyan earthquakes. The results from numerical simulation include the variation of principal stress field released by these two earthquakes, contour patterns of maximum shear stress change, variation patterns of displacement vectors before and after the earthquakes and variation of the earthquake fault slip with time, which agree basically with the focal mechanisms, macroscopic isoseismal and horizontal displacement characters from observations.

Key words: discontinuous deformation analysis; numerical simulation; rupture processes of earthquake