

文章编号: 0253-3782(2001)06-0659-04

研究简报

1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震 序列的破裂过程研究^{*}

陈学忠¹⁾ 盖增喜²⁾ 周仕勇²⁾ 郭铁栓³⁾ 朱令人⁴⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国北京 100871 北京大学地球物理系

3) 中国北京 100036 中国地震局分析预报中心

4) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

关键词 岫岩地震 相对定位 破裂过程

中图分类号: P315.3 文献标识码: A

众所周知,对地震破裂过程的研究不仅会深化对地震发生过程的认识,同时也有助于攻克地震预测这一世界性科学难题.对这方面的研究一直受到国内外地震学家的重视.从 20 世纪 90 年代初,他们开始着眼于研究主震发生过程中的主破裂时空过程的研究.这方面的研究通常是利用数字化地震观测波形资料,借助于反演方法,反演出地震的震源破裂过程.通过对地震破裂时空进程成像,发现了地震破裂过程的复杂性.地震破裂不但在空间上是非均匀的,而且在时间上也是错综变化的,这些成果使我们对地震的发生过程有了更加深入的认识(Chen *et al.*, 1996; 许力生,陈运泰,1997,1999).

基于断层力学方面的研究,提出了震前地震成核概念.地震成核是主破裂前的阶段,这个阶段的研究对地震预测有直接意义.理论和实验研究结果揭示出震前存在成核过程,利用地震观测资料证实震前成核过程的存在并揭示其特征,是目前在这方面研究的主要内容(Ohnaka, Kuwahara, 1990; Ohnaka, 1992; Hurukawa, 1998; Rastogi, Mandal, 1998; 陈学忠等, 2001).

上述研究还仅限于地震破裂全过程的一个阶段,没有将一次地震破裂的全过程作为一个整体加以研究.对一次地震破裂全过程的研究将有助于更加深入认识地震破裂过程,对地震预测具有现实意义.利用波形反演法,要反演出整个地震序列所有地震的破裂过程是很难的.对于一个地震序列,中小地震的发生实际上反映了震源区介质的局部破裂,如果能对整个地震序列的地震进行精确定位,分辨出各次地震的相对位置变化,然后分析各次地震震源位置的相对变化,就可以明了地震破裂的全过程.这种方法已经被用于研究前震的成核过程(Ohnaka, 1992; Hurukawa, 1998; Rastogi, Mandal, 1998; 陈学忠等, 2001).1999 年 11 月 29 日辽宁省岫岩地区发生了 5.4 级地震,震前有显著前震活动,震后于 2000 年 1 月 12 日又发生一次 5.1 级地震,是一次很好的研究地震破裂全过程的震例.本文对该序列进行定位,借助于时空图象分析方法,分析序列发展过程中各次地震震源位置的相对变化,进而揭示该序列的破裂过程.

相对定位法又称主地震定位法.其基本原理是选定一震源位置较为精确的主地震(或叫参考地震),计算待定地震相对于它的位置,进而确定这些待定地震的震源位置.由于相对定位法对所假设的地壳模型依赖较小,因此比通常的绝对定位法所得到的震源位置准确.对于震源破裂过程的研究,只要知道相

^{*} 国家重点基础研究发展规划《大陆强震机理与预测》项目(95-13-05-04)资助.中国地震局地球物理研究所论著 01AC1020.

2001-04-24 收到初稿,2001-10-09 收到修改稿并决定采用.

对位置变化即可，因此，这种方法很适合于研究地震序列的破裂过程。

1 资料和定位结果

1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震发生在北东向断层占优势的地质构造复杂的地区，位于 1975 年 2 月 4 日海城 7.3 级地震震中区边缘。主震震中位置位于北西西向断层上，似乎表明这次地震是发生在北西西向的断层上，与主震震源机制解的一个节面 $N64^{\circ}W$ 是一致的，但这还不能说明这次地震就发生在这条断层上，还要看余震震中的分布情况。

这次地震是一次前-主-余型地震序列，辽宁省沈阳遥测台网很好地对该序列进行了观测。本文收集了辽宁省沈阳遥测台网观测报告资料，对该序列 2 级以上地震进行定位，得到了余震震中分布，分析了序

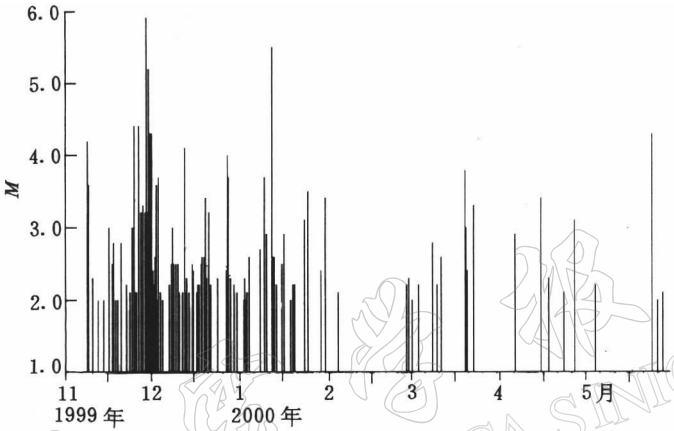


图 1 所定位地震的 $M-t$ 图

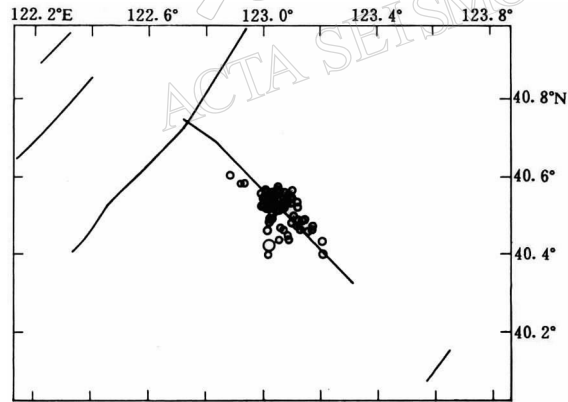


图 2 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震序列震中分布图

列的破裂过程。定位所用台站的震中距最远为 315 km，最近为 34 km。在定位时，一次地震最多用到的台站数为 34 个，最少是 3 个，平均为 20 个台站。取 5.4 级地震为定位用的参考地震，即主地震。其震中位置为 $40^{\circ}32'N$ ， $123^{\circ}02'E$ ，震源深度为 10 km。图 1 为所定位的地震的 $M-t$ 图，从 1999 年 11 月 9 日~2001 年 5 月 27 日。2 级以上前震 42 次，余震 262 次。3 级以上前震 14 次，余震 66 次。经、纬度的定位误差较小，为 0.03~0.04 km，定位精度较高。震源深度的定位误差在 2 km 以上，多数为 2 km，个别的误差较大，最大为 9 km。在分析震源深度的变化时将误差大于 4 km 的地震舍去。图 2 为所定位的地震震中分布图，沿北西向断层分布，长约 36 km。

2 破裂过程分析

为了弄清楚该序列的破裂过程，本文通过分析地震的震中经、纬度和震源深度随时间的变化，然后给出不同时段震中分布图，进一步分析其破裂扩展过程。

2.1 震源深度随时间的变化

图 3 为序列的震源深度随时间的变化曲线。从图 3 可以看出，最大震源深度变化可分成两个阶段：以 2000 年 1 月 12 日 5.1 级地震为界，在此前，最大震源深度变化明显，其后变化平稳。最大震源深度的明显变化可能反映破裂在继续沿竖直向扩展。它趋于平稳可能说明破裂竖直向扩展趋于结束。

仔细分析 2000 年 1 月 12 日 5.1 级地震前最大震源深度的变化过程可知，在主震前，最大震源深度有增加的现象；而主震后，最大震源深度起伏变化，破裂向浅部扩展的同时也向深部扩展，但主要是向浅部扩展；然后趋于稳定。从 12 月 9~20 日，最大震源深度逐渐变小，反映破裂向浅部扩展，以后变化平稳，约 22 天以后发生了 5.1 级地震。

2.2 震中位置随时间的变化

图 4 为各时段的震中分布图。从图中可以看出，1999 年 11 月 9~28 日，即 5.4 级地震前，地震集中于一个尺度约 5 km 的较小的区域内(图 4a)；从 11 月 29~30 日，地震往外扩散，几乎沿北西向分布，尺度约 36 km(图 4b)；从 12 月 1~8 日，地震又集中在与图 4a 相同的区域内活动(图 4c)；自 1999 年 12 月 9 日~2000 年 1 月 11 日，地震活动往主震震中的东南扩散，分布范围尺度约为 24 km(图 4d)；2000 年 1 月 12 日发生 5.1 级地震后，直到 5 月 27 日，地震活动回到与前震活动相同的区域内，只是范围有所扩大，尺度约为 9 km，比前震的活动范围几乎增大了 1 倍。在此期间地震不再扩散，而是集中在一个稳定的区域内活动(图 4e)。

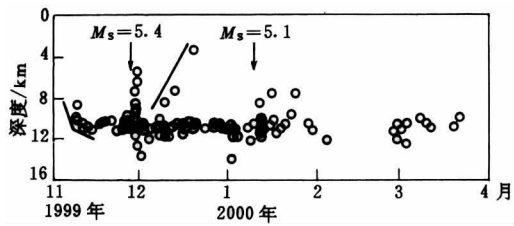


图 3 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震序列震源深度随时间的变化

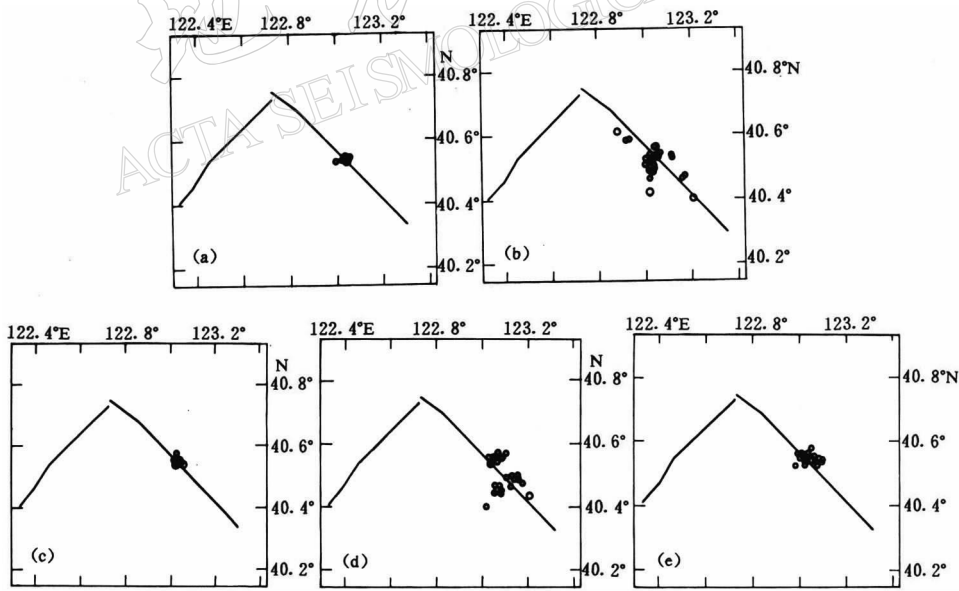


图 4 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震序列不同时段震中分布图

(a) 1999 年 11 月 9~28 日；(b) 1999 年 11 月 29~30 日；(c) 1999 年 12 月 1~8 日；
(d) 1999 年 12 月 9 日~2000 年 1 月 11 日；(e) 2000 年 1 月 12 日~5 月 27 日

从上述分析可以看出，该序列震中分布有以下过程：集中—扩散—集中—扩散—集中。有两次扩散

过程:第一次发生在 5.4 级地震后两天内,可能归因于这次地震的发生引起的周围地区局部破裂所致;第二次扩散发生在 5.1 级地震之前,似乎可以与 5.1 级地震的发生相联系,由于外围的局部破裂使震区再次产生应力集中,从而导致 5.1 级地震的发生。

纵观整个序列的破裂过程,可以得到以下认识:在 5.4 级地震前,前震集中在一个小的区域内活动,似乎有向深部扩展的迹象;5.4 级地震后地震几乎向外围扩散,在竖向主要向上方扩展,在水平方向主要沿北西向扩展,之后震中分布集中在与前震相同的小区域内,接着地震又向外围扩散,同时在竖向有从深部向浅部扩展的迹象,接着 5.1 级地震发生了;之后地震活动几乎一直稳定在一个区域内活动,在深度方向上也没有明显变化。这标志着这次序列破裂扩展趋于结束。

3 结语

对 1999 年 11 月 29 日辽宁岫岩 5.4 级地震序列进行了定位,并利用定位结果分析了序列的破裂过程,得到如下结果:

序列的破裂过程主要发生在 2000 年 1 月 12 日 5.1 级地震前,在破裂过程中,分为两个阶段:第一阶段是在 1999 年 11 月 29 日 5.4 级地震前,震中分布在约 5 km 的较小范围内,震源深度由浅入深,表明破裂主要在竖直方向上由浅部向深部扩展;第二阶段是在 5.4 级地震和 5.1 级地震之间,地震活动有沿东南方向向外围扩散的现象,震源深度由大变小,表明破裂是由深部向浅部,同时沿东南方向向外扩展。

1975 年海城 7.3 级地震的前震破裂成核带逐渐扩展,扩展速率逐渐增大,前震的震源深度随时间的变化揭示了破裂成核开始于浅部,然后逐渐向下传播,最后导致主震的发生(陈学忠等, 2001)。

上述现象如果得到进一步证实,不仅可以使我们对地震的破裂过程加深认识,而且对地震预测具有意义,值得深入研究。

参 考 文 献

- 陈学忠,郭铁栓,朱令人. 2001. 一个大陆强震前震成核的实例[J]. 地震学报, **23**(2): 213~216
- 许力生,陈运泰. 1997. 用宽频带数字波形资料反演共和地震的震源参数[J]. 地震学报, **19**(2): 113~128
- 许力生,陈运泰. 1999. 1997 年中国西藏玛尼 $M_s7.9$ 地震的时空破裂过程[J]. 地震学报, **21**(5): 449~459
- Chen Y T, Xu L S, Li X, *et al.* 1996. Source process of the 1990 Gonghe, China, earthquake and tectonic stress field in the Northeastern Qinghai-Xizang(Tibetan) plateau[J]. *Pure Appl Geophys*, **146**(3/4): 697~715
- Hurukawa N. 1998. The 1995 Off-Etorofu earthquake: joint relocation of foreshocks, the mainshock, and aftershocks and implication for the earthquake nucleation process[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **88**(5): 1 112~1 126
- Ohnaka M. 1992. Earthquake source nucleation: a physical model for short-term precursors[J]. *Tectonophysics*, **211**: 149~178
- Ohnaka M, Kuwahara Y. 1990. Characteristic features of local breakdown near a crack-tip in the transition zone from nucleation to unstable rupture during stick-slip shear failure[J]. *Tectonophysics*, **175**: 197~220
- Rastogi B K, Mandal P. 1998. Foreshocks and nucleation of small to moderate-sized Koyana earthquakes(India). *Bull Seism Soc Amer*, **88**(5): 1 112~1 126

THE INVESTIGATION OF RUPTURE PROCESS OF THE XIUYAN 5.4 EARTHQUAKE ON NOVEMBER 29, 1999

Chen Xuezhong¹⁾ Gai Zengxi²⁾ Zhou Shiyong²⁾
Guo Tieshuan³⁾ Zhu Lingren⁴⁾

1) Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, Beijing 100081, China

2) Geophysical Department of Beijing University, Beijing 100871, China

3) Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China

4) Seismological Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830011, China

Key words: Xiuyan earthquake; master event location method; rupture process