



动态

2010 年 4 月 14 日玉树地震: 一个有前震的破坏性地震

倪四道^{①*}, 王伟涛^②, 李丽^③^① 中国科技大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;^② 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;^③ 中国地震局地壳运动监测工程研究中心, 北京 100036

* E-mail: sdni@ustc.edu.cn

收稿日期: 2010-04-26; 接受日期: 2010-04-29

中国科学院知识创新工程项目(编号: KZCX2-YW-116-1)和地震行业基金(批准号: 200808078)资助

2010 年 4 月 14 日早晨, 在青海省玉树藏族自治州玉树县发生了一次强烈地震, 地震面波震级达到 7.1 级($M_s 7.1$, <http://www.csndmc.ac.cn>; 矩震级 $M_w 6.9$, <http://neic.usgs.gov>). 地震震中距离玉树县城 30 km 左右, 此次地震造成了巨大的人员伤亡和经济损失, 两千多人不幸罹难, 一万多人受伤. 地震发生后, 中国政府采取了及时有效的救援措施, 从废墟中抢救出六千多个生命. 除此之外, 玉树 $M_s 7.1$ 主震前 2 h 左右发生了一次 $M_s 4.7$ 前震, 被这次前震惊醒的一位村长和一位校长分别督促当地村民和师生及时疏散, 创造了在主震中零伤亡的奇迹. 虽然当地居民只感受到一个前震, 但根据离主震震中 30 km 左右的玉树地震台站记录, 主震之前发生了几十个前震(图 1). 在主震前一天, 小地震开始活动; 在 $M_s 4.7$ 地震发生后, 地震活动性急剧增强; 从主震前半小时开始, 地震活动却趋于平静, 直到主震前 2 min 又出现一个小地震, 之后主震发生(图 2). 从图 2(b)还可以看出, 主震前的地震具有震级越来越强的趋势. 2009 年意大利的 L'Aquila 地震的前震序列也可以清楚地观测到这种变化趋势^[1].

在所有的地震短临前兆中, 前震是学术界公认的预报强震的最有效的指标之一^[2], 然而关于有多少地震伴随有前震仍存在争议. 一些研究者认为只有 10% 的地震有前震, 另外一些研究者则认为高达 50%

的地震有前震^[3]. 这些分歧可能源于对前震定义方式的不同. 早期的一些研究者认为主震发生前数天乃至数月、且距离主震震中几十公里以内的地震都是前震; 而目前多数震源物理学家则认为只有距离主震震中很近(数公里或更近)、且发生在主震之前的地震才是真正意义上的前震^[4,5]. 很多地震台站均记录到玉树 $M_s 4.7$ 前震, 根据这些记录可以对该前震和 $M_s 7.1$ 主震进行相对定位. 定位结果表明, $M_s 4.7$ 地震和主震的震中位置非常接近, 两者距离小于 2 km, 因此 $M_s 4.7$ 地震是一个严格意义上的前震.

在主震发生之前, 很难判定一个地震是下一个强震的前震还是其本身已经是主震. 陈颀^[6]对前震和余震的特征进行了研究, 发现前震在空间上集中、震源机制解也都比较类似, 而余震在空间上发散、机制解差异大. 据此, 陈颀^[6]提出利用震源参数的一致性可以判别一个地震序列是前震序列还是正常的主震-余震序列. 除此之外, 基于 b 值等统计方法, 也被用于区别是前震序列还是主震-余震序列^[7]. 对于玉树地震序列而言, 几十个前震都具有相似的波形(图 3), 表明震源机制解较为相似. 这些事件的 S-P 的到时差有最大 0.4 s 的差异变化, 表明事件集中在大约 3 km 的前震区内. 按照陈颀^[6]的理论, 玉树主震之前发生的这些波形类似、空间集中的地震可以判定为前震, 而非一般的主震-余震序列.

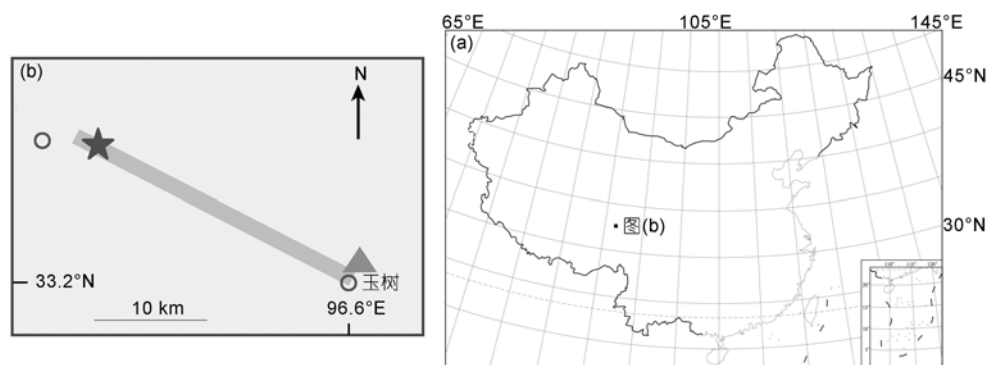


图 1 2010 年 4 月 14 日玉树地震位置示意图

五角星为主震震中, 粗线表示地震破裂范围, 三角形为玉树地震台站

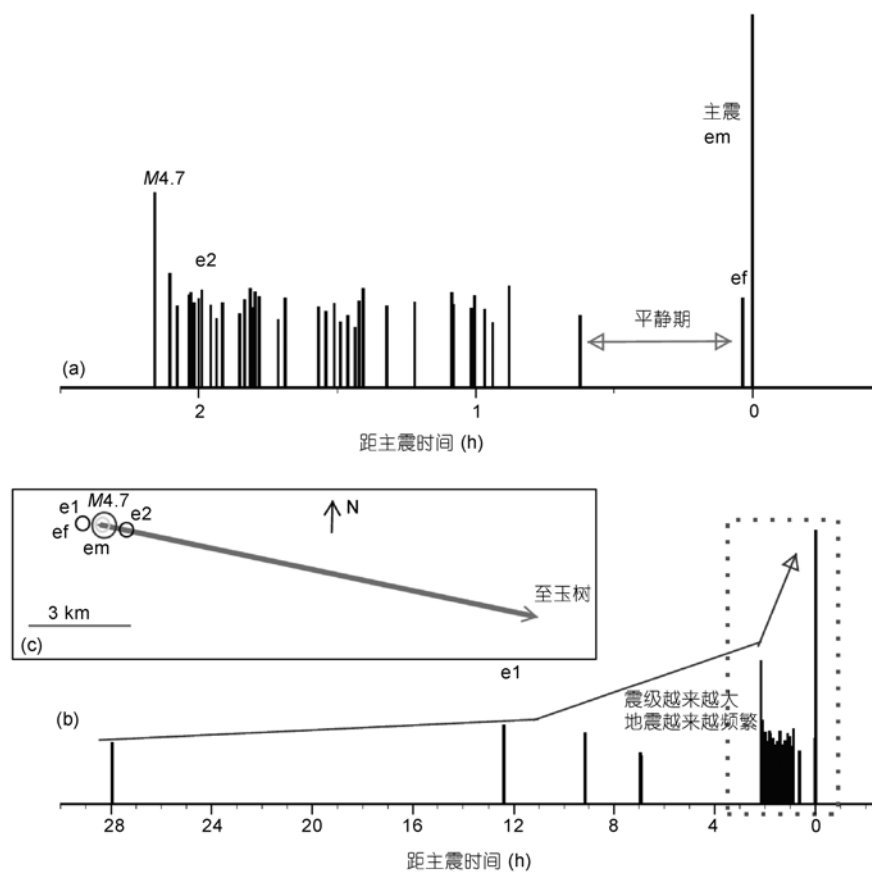


图 2 玉树地震前震序列随时间的演化

(a) 主震前 3 h; (b) 主震前 30 h; (c) 一些前震和主震相对位置示意图

前震和主震在空间上比较接近, 前震主要发生在主震的震中附近, 即主震开始破裂的地方, 因此根据前震判定主震的位置也是比较容易的. 对美国加利福尼亚州一些强震的前震进行高精度定位后, 研

究者发现前震发生在主震震中附近很小的一个区域^[8,9], 玉树地震序列也是如此. 玉树前震之间波形类似而且 S-P 到时差变化不大, 表明前震发生在很小的一个区域; 而且通过对主震和 $M_{\text{s}}4.7$ 前震的相对定

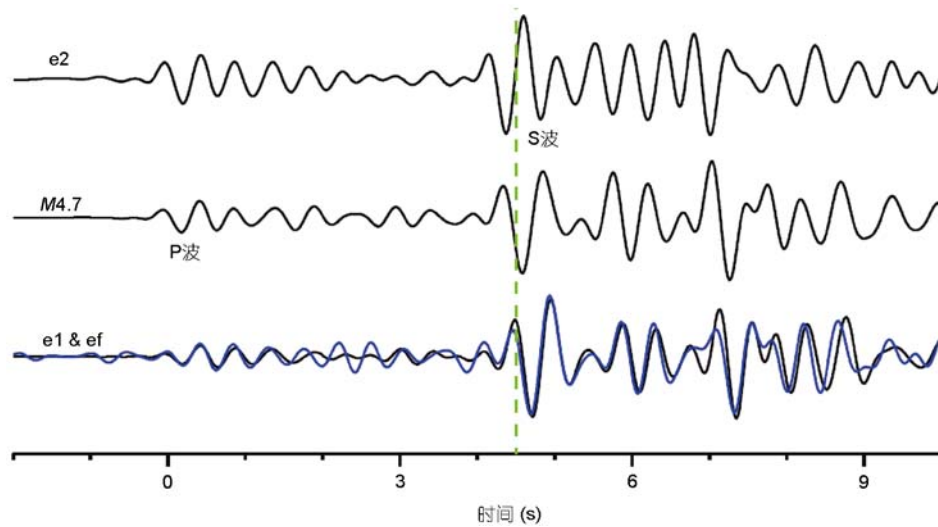


图 3 部分玉树前震的波形

前震 e1(黑色线条)和 ef(蓝色线条)几乎重合,表明这两次事件位置非常接近.不同前震之间 S-P 到时差在 0.4 s 内,表明前震区大约为 3 km

位,可以看出主震的震中处在震区内(图 3).

在发震的时间关系上,前震和主震也具有一定规律.以前的一些研究表明前震也符合类似于余震的大森定律,即离主震时间越近,地震越频繁;但是在主震之前会有短暂的平静现象^[5,10].因此如果从前震-主震序列的时间演化规律有足够的了解,从前震序列的演化过程推断主震发生的时刻也是有可能的.此次玉树地震的前震序列似乎也符合上述特征:前震越来越频繁,在主震前半小时左右进入平静期,至主震前 2 分钟时又发生一次小地震,之后主震发生(图 2).但是如何从此次前震序列中提取出信息,判断主震具体发生的时刻还需更多的研究.

通过前震估计主震的震级更是一个难题.甚至一些研究表明最大前震的震级和主震震级没有明显的相关性^[2].从图 2 可以看出,玉树前震的震级越来越大,如果假定此次地震序列不属于震群型而是前震型,也许可以由此推测后续的主震震级更大.

总而言之,根据目前地震学已经掌握的规律可以判定在 4 月 14 日 $M_s 7.1$ 强震之前发生的地震是真正的前震.但是根据目前的地震学研究水平,对主震震级和发生的时刻进行估算仍然是个难题.以前的前震研究多数基于对震源参数的统计上,而地震波形中携带了更多的信息,可以更好的反映震源成核的过程,将来的研究应该注重波形分析.

致谢 感谢中国地震台网中心提供了波形数据,感谢审稿人提出的修改意见.

参考文献

- 1 李丽,陈颢. 2009 年 4 月 6 日意大利拉奎拉地震的前震及其预测意义. 中国地震, 2009, 25: 151—158
- 2 Jones L M, Molnar P. Some characteristics of foreshocks and their possible relationship to earthquake prediction and premonitory slip on fault. J Geophys Res, 1979, 84: 3596—3608
- 3 Abercrombie R E, Mori J. Occurrence patterns of foreshocks to large earthquakes in the western United States. Nature, 1996, 381: 303—307
- 4 Mogi K. Earthquake Prediction. Tokyo: Academic Press, 1985
- 5 Scholz C H. Mechanics of Earthquakes and Faulting. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 6 陈颢. 用震源机制一致性作为描述地震活动性的新参数. 地球物理学报, 1978, 21: 140—159
- 7 Suyehiro S, Asada T, Ohtake M. Foreshocks and aftershocks accompanying a perceptible earthquake in central Japan—On a peculiar nature of foreshocks. Pap Meteorol Geophys, 1964, 15: 71—88
- 8 Dodge D, Beroza G, Ellsworth W. Detailed observations of California foreshock sequences: Implications for the earthquake initiation process. J Geophys Res, 1996, 101(B10): 22371—22392
- 9 Zanker E E, Beroza G C, Vidale J E. Waveform analysis of the 1999 Hector Mine foreshock sequence. Geophys Res Lett, 2003, 30: 1429, doi: 10.1029/2002GL016383
- 10 Scholz C H. Mechanisms of seismic quiescences. Pure Appl Geophys, 1988, 126: 701—718