

2010 年玉树地震 $M_s 4.7$ 前震特征研究^{*}

马辉青, 马建新, 姚家骏, 陈玉华

(青海省地震局, 青海 西宁 810001)

摘要: 2010 年玉树 7.1 级地震前发生了一次 $M_s 4.7$ 前震, 通过研究其地震活动、数字地震观测资料等, 发现 $M_s 4.7$ 前震具备显著的特征, 主要有打破 $M \geq 4$ 地震空区以及高波速比、高应力降等, 对一些特殊地区的大震跟踪具有积极意义。

关键词: 玉树地震; 前震; 波速比; 应力降

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2014)增刊-0016-06

0 引言

2010 年 4 月 14 日青海玉树发生了 $M_s 7.1$ 地震, 造成了重大的人员伤亡与财产损失。震前 2 小时左右震源区发生了一个 $M_s 4.7$ 前震, 引起了不少关注 (倪四道等, 2010; 刘蒲雄, 吕晓健, 2012)。目前学术界对前震尚无统一的定义, 但多数学者认为前震的含义是主震之前发生在距离主震震中很近的地震。梅世蓉和冯德益 (1993) 将前震定义为主震前发生在震源区内与主震有关的一些地震, 前 40 天内发生在距主震 100 km 内的地震是有意义的前震, 或称直接前震。陈运泰等 (2000) 在论述破裂起始现象时指出: 瞬时前震, 指的是在较大地震之前非常短的时间内 (一般为一天或几天内) 发生的、距离较大地震很近的小地震, 这些小地震被认为是较大地震的“种子”。研究结果表明玉树发生的 $M_s 4.7$ 前震和 $M_s 7.1$ 主震位置非常接近, 震中距离小于 2 km, 因此该 $M_s 4.7$ 地震是一个标准的前震 (倪四道等, 2010)。前震是学术界公认的强震预报指标之一, 因此前震的特征与识别也一直是地震学重要的研究内容之一 (朱传镇, 王林瑛, 1996; 王林瑛等, 2005)。

中国大陆近代发生的十几次强震中有明显前震的例子并不多 (刘蒲雄, 吕晓健, 2012), 玉树地震是全国地震台网十五数字化改造以来记录到的第一个具有明显前震的大震, 因此可在传统地震活动图

像分析的基础上, 进一步用数字地震观测资料分析方法辨识该前震特征。本文从地震活动图像与数字地震学方面对玉树地震做了一系列较为深入的研究, 得到了 $M_s 4.7$ 前震的一些显著特征。前震的特殊性与主震的必然性在逻辑上是相连的, 研究前震特征对判断震情趋势有较好的积极意义。

1 $M_s 4.7$ 前震对玉树周边地震活动图像的影响

陈玉华和马震 (2008)、刘蒲雄和吕晓健 (2008) 等在震前已经注意到玉树周边地区地震活动图像的异常现象, 并不断地跟踪。玉树地区地质构造复杂、强震多发, 但 1995 年 12 月 18 日青海玛多 6.2 级地震后, 玉树周边的青海南—西藏东地区形成大面积的 $M \geq 6$ 地震平静, 汶川地震发生后, 该空区内仍持续平静, 2007 年 5 月 7 日西藏妥坝 5.6 级地震后, 该区域内部又出现了一个 $M \geq 5$ 地震平静区。2009 年 5 月 11 日以后, 该区内部 $M_s \geq 4$ 地震也开始平静。 $M \geq 6$ 、 $M \geq 5$ 及 $M_L \geq 4$ 地震空区配套出现 (图 1), 且平静区有向未来玉树震中区收缩靠拢的迹象。

2010 年 4 月 14 日 5 时 39 分的 $M_s 4.7$ 地震打破了玉树周边地区 $M_L \geq 4$ 地震长时间的平静, 地震活动图像突破现象显著。 $M \geq 7$ 大震前地震活动空区、条带、增强和平静的异常演变具有类似的过程, 跟踪这些地震活动图像及其演变, 有利于识别中等强度 (4、5 级左右) 的地震是否为前震。^①

^{*} 收稿日期: 2014-08-30.

基金项目: 2014 年星火计划青年项目 (XH14050Y) 和 2014 年震情跟踪合同制项目 (20140123) 联合资助.

① 刘蒲雄, 吕晓健. 2008. 中国大陆地震形势跟踪预测和 2009 年地震趋势估计.

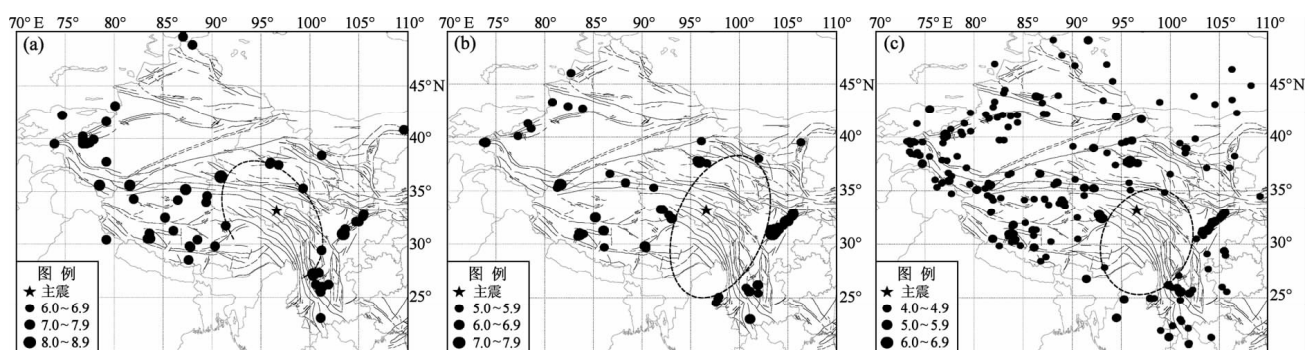


图1 2010年玉树7.1级地震前地震活动图像演化

(a) 1996年1月至2010年4月14日 $M \geq 6$ 地震分布; (b) 2007年6月~2010年4月14日 $M \geq 5$ 地震分布;
(c) 2009年6月~2010年4月14日 $M_L \geq 4$ 地震分布

Fig. 1 Evolution of the seismic patterns before the Yushu $M_s 7.1$ earthquake in 2010

(a) distribution of $M \geq 6.0$ earthquakes from Jan., 1996 to Apr., 14, 2010; (b) distribution of $M \geq 5.0$ earthquakes from Jun., 2007 to Apr. 14, 2010; (c) distribution of $M_L \geq 4.0$ earthquakes from Jun., 2009 to Apr. 14, 2010

$M_s 4.7$ 地震的发生造成了玉树周边地区中等地震年尺度上的活动图像发生显著变化, 反映了在前期大范围应力背景控制下, 震中附近地壳应力状态发生了新的变化, 传递了一种重要的前兆信息。

2 $M_s 4.7$ 前震特征

青藏高原地震台网分布稀疏, 多数地区地震监测能力低, 经过“十五”数字化改造后, 青海地区地震台网密度有了很大的提高, 玉树地区由“九五”时期仅有的玉树台增加到玉树(YUS)、杂多(ZAD)、曲玛莱(QML)3个宽频带观测台站, 提供的观测数据满足了研究震源区波速比、场地响应、介质品质因子及震源参数的最基本条件。本文利用数字观测资料对玉树 $M_s 4.7$ 前震的波速比及应力降特征进行研究, 图2为玉树地震震区周边的台站分布图。

2.1 $M_s 4.7$ 前震高波速比特征

波速比作为地震波的运动学特征之一, 在一定程度上反映了大地震前后地下介质速度结构变化信息, 研究波速比的演化特征, 逐渐成为寻求大震前兆信息的一种手段。近年来, 数字化地震记录全面取代了模拟记录, 由于数字波形可以在计算机屏幕拉伸放大, 可以比较准确判断震相到时, 减少了读数误差, 计算波速比的精度有了很大的提高。

本文利用玉树地震震中周边3个台站的数字震相观测报告及波形资料研究了玉树地震前后波速比变化特征, 发现玉树 $M_s 4.7$ 前震的波速比特

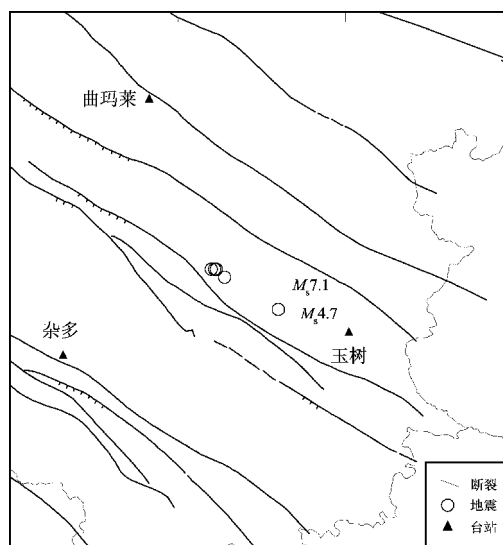


图2 玉树7.1级地震及 $M_s 4.7$ 前震及周边地震台站分布图

Fig. 2 Distribution of seismic Stations of surrounding area of the Yushu $M_s 7.1$ earthquake and $M_s 4.7$ foreshock and its

别高, 临震回升现象显著。

图3显示玉树 $M_s 7.1$ 地震前后玉树地震台波速比演化过程, 其中粗实线为5次平滑曲线, 虚线为数据平均值, 虚点线为数据标准差。由图3可以看出: 平均波速比震前为1.720, 震后为1.740, 地震前后平均波速比围绕理想弹性体波速比值起伏; 2009年底波速比开始下降, 至2010年2月11日降至1.666后缓慢升高, 3月26日升至1.755, 而在 $M_s 4.7$ 前震发生时, 波速比跳跃至2.032, 可见玉树地震台波速比临震回升现象显著。曲玛莱、

杂多两个地震台 $M_s 4.7$ 前震之前波速比的演化如图 4 所示。

自 2009 年 12 月底开始玉树、杂多、曲玛莱 3

个地震台站波速比, 在时间演化进程上同时出现较明显的异常过程: 下降—持续异常—回升—发震。 $M_s 4.7$ 前震发生时, 3 个台站波速比相对于

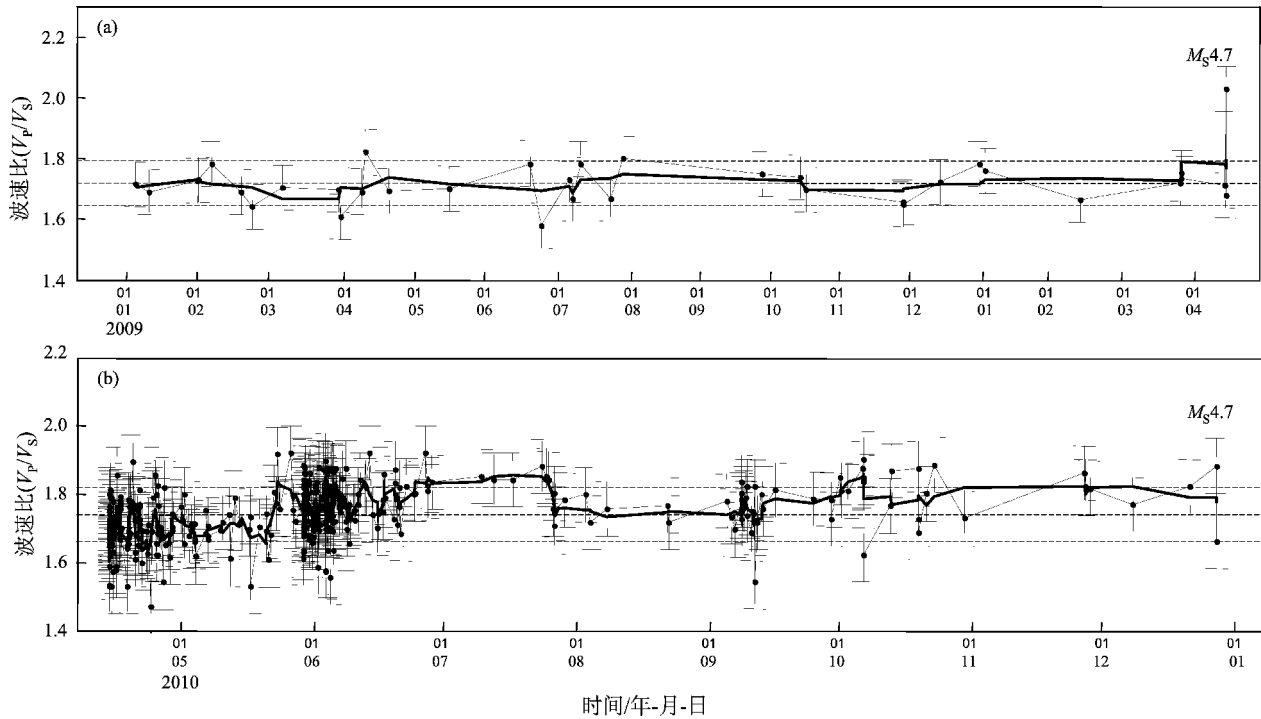


图 3 玉树地震前 (a)、后 (b) 玉树地震台波速比演化曲线
Fig. 3 The evolution curve of wave velocity ratio at Yushu Station before (a) and after (b) the Yushu $M_s 7.1$ earthquake

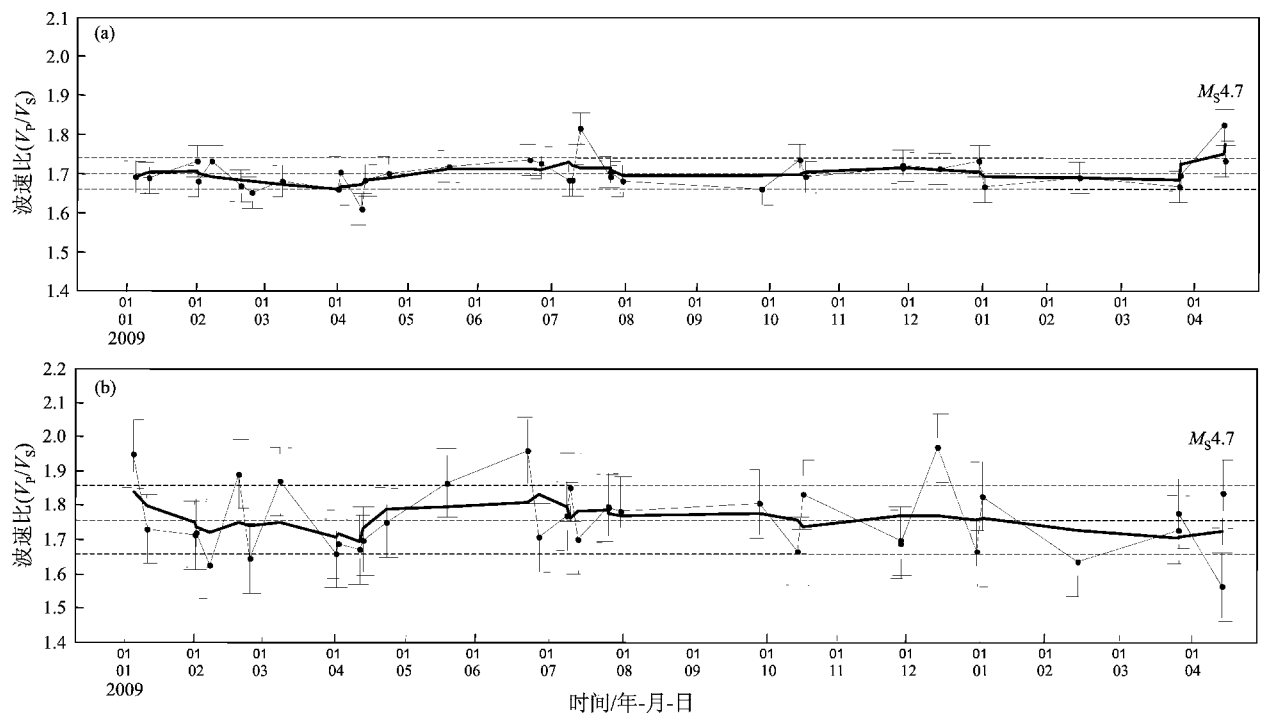


图 4 曲玛莱 (a)、杂多 (b) 地震台波速比变化曲线
Fig. 4 The evolution curve of wave velocity ratio at Qumalai (a) and Zaduo (b) stations before the Yushu $M_s 7.1$ earthquake

2010年3月底均有大幅升高,其中玉树地震台由3月底的1.721升至2.032,为该台自2009年1月以来最高值,杂多地震台由1.727升至1.833,曲玛莱地震台则在4月13日增至1.822(该值也为2009年1月以来最高值),前震发生时变成1.734。

3个台站波速比升高的步调基本一致,相关性比较高,可见在 $M_s 4.7$ 前震时,震源区周围波速比高值回升现象是显著的。关于波速比高值回返与大震的关系,也是地震学家研究的焦点之一,目前的一种解释是:利用岩石破裂实验研究岩石波速变化,当岩石承受的压力达70%~90%破裂应力时,其波速会下降,下降幅度在未来断裂面的垂直方向较大,平行方向较小。如果岩石特征刚度与压机系统刚度相近,在逼近破裂时波速比就会回升(赵晋明等,1996),即临震时可能出现高波速比突变。由于该区震前大范围的地震平静,地壳应力处于闭锁状态, $M_s 4.7$ 前震时波速比的突变是否反映出地壳应力的快速解锁?需要进一步

探讨与研究。

2.2 $M_s 4.7$ 前震的高应力降特征

利用青海地震台网数字波形记录,反演了玉树地震序列的应力降等震源参数。首先对EW、NS向速度波形记录进行波形旋转、滤波、去除仪器响应等处理,分别得到SH分量的观测位移谱与噪音谱,然后挑选部分记录较好、信噪比高的数据,采用Atkinson方法(Atkinson, Mereu, 1992)、Moya方法(Moya, Aguirre, 2000)反演玉树地区地震波衰减因子 $Q(f)$ 及玉树、杂多、曲玛莱3个地震台站的场地响应。

图5给出了按上述方法得到的玉树地区 Q 值和频率 f 的关系以及场地响应曲线。玉树地区地震波衰减因子 $Q(f) = 108.72f^{0.615}$, 其中 Q_0 值为108.72(即 f 为1 Hz 时的 Q 值),介质的吸收系数 $\eta = 0.615$ 。玉树、杂多、曲玛莱3个地震台站的场地响应均有高频衰减特征(图5b、c、d)。

Q 值的物理含义(华卫, 2007)表示 Q_0 值的

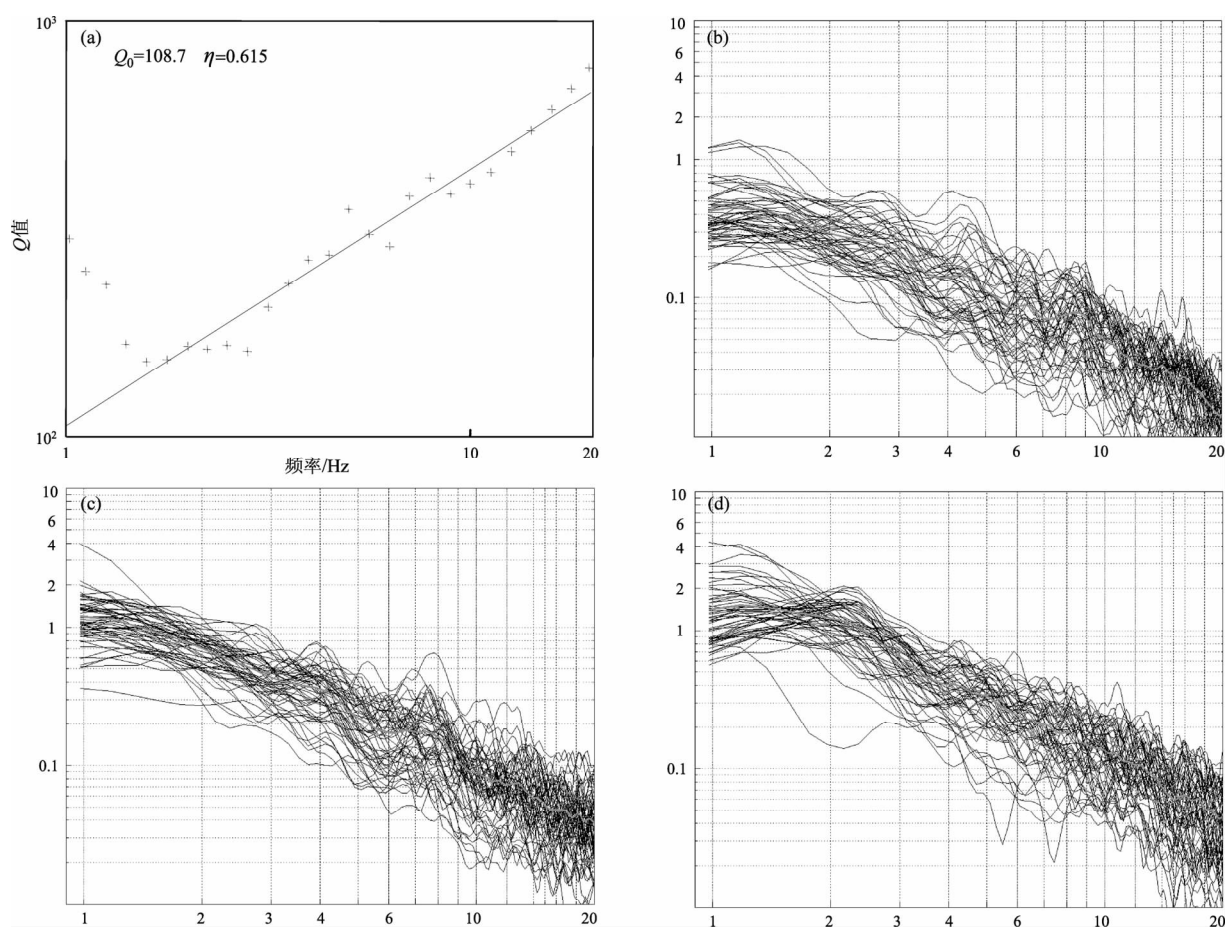


图5 玉树地区地震波衰减模型 (a) 及玉树 (b)、杂多 (c) 和曲玛莱 (d) 地震台的场地响应特征
Fig. 5 Seismic wave attenuation model in Yushu Region (a) and site response characteristic of Yushu (b)、Zaduo (c) and Qumalai (d) Stations

大小与介质的均匀程度相关联, Q_0 值较低的区域介质均匀程度低, 地震波经过时, 能量耗损大, 衰减较快, 构造活动强烈; Q_0 值较高则情况反之。 η 值与 Q_0 值含义相反, 介质均匀程度较低的地区, Q 值与频率的依赖关系较强, η 值可能较大, 介质均匀程度较高的地区, Q 值与频率的依赖关系较弱, η 值可能较小。

赵翠萍等 (2010) 用同样的方法研究中国大陆各区域地震波的衰减特征, 发现不同地区的地震波衰减特征不同, Q_0 值在 190 ~ 700 之间, η 值在 0.3 ~ 0.7 之间。本文研究的玉树地区 Q_0 值较低, η 值则较大, 反映该区地壳上部介质均匀程度较低, 该现象应与 2010 年玉树 $M_s 7.1$ 地震强构造活动有关。

在获得 Q 值与台北场地响应的基础上, 在频率域内对每个台站记录的每个中小地震进行几何衰减、非弹性衰减、场地响应等校正, 求其平均值以消除方向性效应, 最终反演得到包括前震在内的玉树地震序列 44 个 $M_L \geq 3.0$ 中小地震的震源参数, 图 6 显示了这些地震应力降的变化曲线。

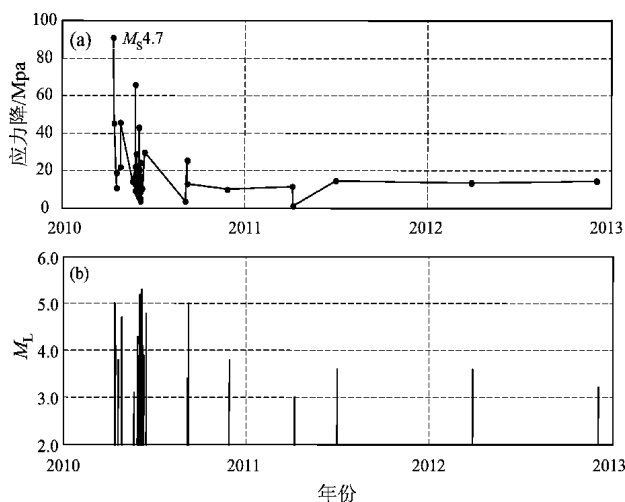


图 6 玉树地震序列中小震应力降变化曲线 (a) 及对应的 $M-T$ 图 (b)

Fig. 6 The variation curve of stress drop (a) and its $M-T$ diagram of small and medium earthquakes in Yushu earthquake sequence

由玉树地震序列中小震应力降变化特征可以看出, 应力降的变化趋势与余震衰减趋势基本一致, 但是玉树前震的应力降相对于余震的应力降显著较高, 且分别是 4 次相近震级余震的 7.6、2.1、18.2 和 4.1 倍。经过统计, 玉树地震共发生

与前震震级相近的 $M_L 5.0 \sim 5.3$ 余震 5 次, 其中一次余震发震时间因和主震太近, 其波形湮没在主震发生后的低频振荡中, 未能反演出震源参数。

关于前震应力降较高的原因, 齐国英和郭亚平 (1975) 认为在 $M_L \geq 6.0$ 大地震之前, 介质中的应力背景很高, 因而前震的应力降较大; Jones 和 Helmberger (1998) 在研究美国加州东部剪切带多个地震序列的震源参数时, 认为高应力降地震可能与断层存在的高剪应力背景有关。根据上述观点, 玉树 $M_s 4.7$ 前震应力降较高的物理原因可解释为: 震前甘孜—玉树断裂玉树段储存了高剪应力应变, 前震的发生未能释放断层的应变能, 应力降很高, 主震的发生释放了震源区储存的大部分剪应力应变能, 因此, 余震序列中相近震级地震的应力降相对于前震大幅度减少, 而高剪应力背景的假设与后来测定玉树地震序列以走滑为主的结果有很好的相符。

3 结论与讨论

本文通过对大量地震活动资料、数字观测资料的处理, 分析了 2010 年玉树地震震前地震活动图像、波速比以及地震序列的应力降特征, 总结发现 2010 年玉树地震 $M_s 4.7$ 前震具有一些显著特征, 主要表现在:

(1) $M_s 4.7$ 前震打破了玉树及其周边 2009 年 5 月 11 日以来形成的 $M \geq 4$ 地震平静。

(2) $M_s 4.7$ 前震发生时, 玉树、杂多、曲玛莱 3 个地震台波速比高值回返现象显著, 其中玉树台达到 2.0 左右, 为 2009 年 1 月以来最高值, 是一次波速比突变。玉树台波速比最高, 杂多、曲玛莱台相对较低, 与震中距远近呈正相关关系。

(3) $M_s 4.7$ 前震应力降相对于余震应力降显著较高, 综合齐国英和郭亚平 (1976)、Jones 和 Helmberger (1998) 等的观点, 认为甘孜—玉树断裂玉树段存在高剪应力背景下, 前震应力降较大而震源尺度较小, 主震发生释放了震源区储存的大部分剪应力应变能, 因此, 余震序列中相近震级地震的应力降相对于前震应力降大幅度减少, 高剪应力背景也预示着未来的玉树地震为走滑型序列。

玉树地区地震监测能力较弱, 波速比及震源参数计算有一定的误差, 但经过反复核实, 最终认为 $M_s 4.7$ 前震这些显著特征是客观存在的。

本文认为统计 $M_s4.7$ 前震特征具有大震的前兆意义, 其中地震活动图像演化具有中长期前兆意义, 波速比突变、应力降较高具有短临前兆意义。但是两者又互相矛盾, 背景空区的存在说明了震中周围地震尤其中等地震数目不足, 限制了应力降等震源参数在大震震前的横向比较, 这也再次验证了前兆信息的复杂性, 需要更多的研究与震例验证。中等强度的前震是特殊的, 反过来说, 具有中等强度前震的大震也是特殊的, 这样类型的大震也许只在特定的地球物理背景下存在, 采用多种手段去识别前震特征, 对于跟踪某些特殊的大震具有重要的意义。

本文研究的过程中, 中国工程院院士许绍燮曾和本文作者陈玉华做了不少交流, 对玉树前震研究给予不少关怀和鼓励, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- 陈玉华, 马震. 2008. 8 级特大地震前地震活动平静特征——以中国大陆西部近期两次 8 级地震为例[J]. 高原地震, 20(4): 1–7.
- 陈运泰, 吴忠良, 王培德, 等. 2000. 数字地震学[M]. 北京: 地震出版社, 83–90.

- 华卫. 2007. 中小地震震源参数定标关系研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 75–77.
- 刘蒲雄, 吕晓健. 2012. 2010 年青海玉树 7.1 级地震的前震识别及短临预报可能性研究[J]. 地震, 32(3): 47–51.
- 梅世蓉, 冯德益. 1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 69–73.
- 倪四道, 王伟涛, 李丽. 2010. 2010 年 4 月 14 日玉树地震: 一个有前震的破坏性地震[J]. 中国科学(D 辑), 40(5): 535–537.
- 齐国英, 郭亚平. 1976. 地震波谱与大地震前后中强地震波谱变化[J]. 物理学报, 25(6): 527–532.
- 王林瑛, 陈佩燕, 吴忠良, 等. 2005. 前震特征及其识别研究[J]. 地震学报, 27(2): 171–177.
- 赵晋明, 胡毅力, 王彬, 等. 1996. 在真三轴压缩条件下片麻岩破裂孕育过程中弹性波的特征变化[J]. 地震地质, 8(3): 277–281.
- 朱传镇, 王林瑛. 1996. 前震活动特征及其识别的研究[J]. 地球物理学报, 39(1): 80–87.
- Atkinson G. M., Mereu R. F. . 1992. The Shape of Ground Motion Attenuation Curves in Southeastern Canada [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. , 82(5): 2014–2031. .
- Jones L. E. , Helmlberger D. V. . 1998. Earthquake Source Parameters and Fault Kinematic in the Eastern California Shear Zone [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. , 88(6): 1337–1352.
- Moya C. A. , Aguirre J. . 2000. Inversion of Source Parameters and Site Effects from Strong Ground Motion Records using Genetic Algorithm [J]. Bull. Seismol. Soc. Am. , 90(4): 977–992.

Research on Characteristics of $M_s4.7$ Foreshock of Yushu $M_s7.1$ Earthquake in 2010

MA Hui-qing, MA Jian-xin, YAO Jia-jun, CHEN Yu-hua

(Earthquake Administration of Qinghai Province, Xining 810001, Qinghai, China)

Abstract

An $M_s4.7$ foreshock occurred before the Yushu $M_s7.1$ earthquake in 2010. Using earthquake activities and digital seismic observation data of the $M_s4.7$ foreshock etc. , we found some remarkable characteristics, such as breaking the seismic gaps of $M \geq 4$ earthquakes, high wave velocity ratio and high stress drop etc. . The result may have positive significance to the tracing of strong earthquake in some special areas.

Key words: Yushu $M_s7.1$ earthquake; foreshock; wave velocity ratio; stress drop