

李宇彤、张博、王亮等, 2015, 地震序列中重复地震的累积滑动量对后续中强地震的前兆意义, 中国地震, 31 (2), 235 ~ 244。

# 地震序列中重复地震的累积滑动量 对后续中强地震的前兆意义 ——以辽宁海城 - 岫岩地区 4 个显著地震序列为例

李宇彤 张博 王亮 李彤霞

辽宁省地震局, 沈阳市皇姑区黄河北大街 44 号 110034

**摘要** 海城 - 岫岩地区是辽宁地震多发区, 地震序列频发, 具有区域地震窗口效应。在该地区一些显著的地震序列中, 发现同一台站记录中有多个具有高度相似波形的地震, 即重复地震序列。这些地震发震位置非常接近, 破裂区域基本重合, 因此可能反映孕震断层的一些活动特征。本文利用波形互相关方法对辽宁海城 - 岫岩地区 4 个显著地震序列进行重复地震识别, 研究发现地震序列中重复地震的累积滑动量数值大小似乎与后续中强震在距离上有一定相关性, 其中岫岩  $M_s 5.4$  地震前的前震序列产生的累积滑动量最大, 并在主震前出现明显的滑动加速现象。

**关键词:** 地震序列 重复地震 波形相关 海城 - 岫岩

[文章编号] 1001-4683 (2015) 02-0235-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

“重复地震”即 2 个或 1 组发生在近于同一位置并被同一台站记录到高度相似波形的地震事件, Schaff 等 (2004a) 从可识别的角度将这些“重复地震”定义为至少被 1 个台站记录到的波形相关系数  $\geq 0.8$ 。这些“重复地震”通常大量出现在断层蠕变区 (Nadeau et al, 1995; Vidale et al, 1994; Schaff et al, 1998; Rubin, 2002)、板块俯冲带 (Wiens et al, 2001; Igarashi et al, 2003) 以及大陆地震活跃地区 (Schaff et al, 2004a、2004b; Li et al, 2007、2009; 蒋长胜等, 2008; 彭汉书等, 2010)。

最新的研究结果显示, 一些大震之前在震源处的地震信号中存在大量的“重复地震”, 如 1999 年发生在土耳其伊兹米特 (Izmit) 的  $M_w 7.6$  地震, 震前出现了持续时间较长的源于震源的一连串地震破裂, 并随破裂时间的增加而加速, 且这些地震信号具有高度的相似性 (Bouchon et al, 2011); 倪四道等 (2010) 也发现在 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级主震之前出现了几十个波形十分相似的前震, 这些地震发生的地点非常接近; Li 等 (2011) 同样发现

[收稿日期] 2015-02-28; [修定日期] 2015-03-24

[项目类别] 辽宁省科技厅地震预测预警关键技术研究与应用项目 (2013231028)、中国地震局 2014 年度震情跟踪定向工作任务 (2014010102) 共同资助

[作者简介] 李宇彤, 女, 1967 年生, 高级工程师, 主要从事地震预测研究。E-mail: lyt510530@163.com

1999 年辽宁海城与岫岩交界  $M_s 5.4$  地震前震源附近也出现了 1 组多重地震,其波形非常相似,并在主震前出现滑动加速现象。这些重复地震的空间分布高度集中,从严格意义上讲更接近于前震的特点,利用这些地震可以更有效地提高主震前的识别效率,并可测量到地下介质参数的微小变化。因此,深入研究这些主震前出现的相似波形所携带的信息,对于判断主震的成核期、大震前的不稳定滑动及滑动加速等前兆现象都具有十分重要的意义。

Schaff 等(2004a)在研究中国大陆“重复地震”时认为,“重复事件”可能是静态或动态应力传输或是孔隙流体效应集中在断层上的凹凸体、障碍体蠕变激发产生的;Templeton 等(2008)认为凹凸体周边的较大地震可以引起局部应力的增加,从而加速凹凸体的破裂,这种机制可以解释部分“重复地震”序列的频发特征。“重复地震”产生的机制除了断层的持续滑动以外,火山爆发活动也可以提供重复震源,目前已尝试将其用于火山喷发的预测(Pandolfi et al,2006;Johnson et al,2010)。

从理论上讲,中强地震前在断层出现局部失稳时可能先出现缓慢滑动,可以观测到源于震源的一连串随时间不断重复的信号,这些信号显示起初滑动加速非常缓慢,但在震前会明显加快。事实上,由于地质构造和受力的复杂性,地震序列在空间的分布并不都在 1 个点上,而是在一定区域内,这些小震相互作用,因此很难判断断层何时或是否已经出现失稳。此处我们假设可以在 1 个很小的体积内观察到其内部的小震活动,这样在一定程度上可能更加接近断层的真实活动。目前可行的方法之一就是利用“重复地震”方法,即通过观察天然重复震源产生的波形高度相似的地震序列滑动量的大小和速率,推测该断层或周边断层是否可能发生更大的地震。

海城-岫岩地区是辽宁省地震序列最为活跃的地区,也是中强地震的多发区域,该区于 1975 年发生海城 7.3 级地震、1999 年发生岫岩 5.4 级地震,这 2 次地震都是依据前震序列成功预测的典型范例。薛丁等(2012)研究认为,海城地区具有地震“窗口”效应,该效应对本地区及周边地区地震的发生具有一定的预测效能。辽宁地震台网数字化改造时间较早,1999 年已经正式产出数据,积累了丰富的数字化地震波形资料,为该地区“重复地震”研究提供了基础条件。为进一步对该地区地震序列的前兆性质进行判别,本文采用波形互相关方法对这一地区发现的显著地震序列进行“重复地震”识别,利用其产生的累积滑动特征判断是否与后续中强地震具有一定的相关性。

## 1 海城-岫岩地区的显著地震序列

海城-岫岩地区位于辽东半岛北部,属于中朝地台东北部的辽东隆起区,该区的区域断裂构造比较发育,震区附近规模较大、活动较强的断裂有 NE 向金州断裂和 NW 向海城河-大洋河断裂,其中海城河-大洋河构造带是 1975 年海城 7.3 级地震和 1999 年岫岩 5.4 级地震的主要发震构造,这 2 次地震分别位于其中部和东南端。海城河-大洋河构造带是 1 条新生构造带,属晚更新世-全新世的活动断裂带,1970 年以来的小震基本沿其走向约 100km 的范围内呈带状分布,是辽宁地区地震活动最频繁的地区,经常出现小震丛集现象,一般持续几天至几十天不等,该现象也成为海城-岫岩地区地震活动的特点。1975 年海城 7.3 级强震和 1999 年岫岩 5.4 级中强震都是利用前震序列进行预测的成功范例,因而前震序列也被认为是辽宁地区非常重要的地震前兆。

由于海城-岫岩地区地震序列较多,且多数为小型序列,从后续地震趋势看大部分属于普通序列,并没有直接的前兆意义,因此本文试图从1970年以来的辽宁省地震目录中挑选出具有一定规模和震级水平的显著地震序列,用以讨论其对后续中强地震的预测意义。根据经验寻找高度丛集地震序列的标准为最大震级  $M_{\max} \geq 3.5$ ,地震总次数  $\geq 100$ 。挑选出符合条件的地震序列共6个,依据后续中强地震检验结果可知,其中前震序列2个,前兆序列3个,普通序列1个(表1)。

表1 1970年以来辽宁海城-岫岩地区的显著地震序列

序号	主要集中时段 (年-月-日)	地点	震中	地震 次数	最大 $M_L \geq 3.0$ /		序列 类型	对应地震
					震级 $M_L$	4.0地震 次数		
1	1975-02-02 ~ 1975-02-04	海城	122°35'N, 40°41'E	632	5.1	17/6	前震序列	1975-02-04 海城 $M_S 7.3$ 地震
2	1988-01-03 ~ 1988-02-22	岫岩	123°14'N, 40°30'E	404	3.7	3/0	前兆序列	1988-02-25 彰武 $M_L 5.2$ 地震
3	1999-11-09 ~ 1999-11-29	岫岩	123°03'N, 40°33'E	242	4.4	15/5	前震序列	1999-11-29 岫岩 $M_S 5.4$ 地震
4	2002-04-30 ~ 2002-05-30	海城	122°51'N, 40°42'E	143	3.9	4/0	前兆序列	2003-08-16 巴林左旗 $M_S 5.9$ 地震
5	2004-03-07 ~ 2004-03-23	海城	122°24'N, 40°24'E	128	3.5	1/0	前兆序列	2004-03-24 东乌珠穆沁旗 $M_S 5.9$ 地震
6	2008-11-03 ~ 2008-11-14	海城	122°54'N, 40°41'E	130	4.8	5/3	普通序列	3年之内 500km 范围无中强震

由表1可见,6个地震序列中1975年海城  $M_L 5.1$  地震序列和1999年岫岩  $M_L 4.4$  地震序列为前震序列,从序列的统计参数看其前震序列特征明显(张卫东等,2003),主震于短时间内在序列原地发生。1988年岫岩地震序列的丛集特征也非常显著,但后续中强震并没有发生在序列附近,而是在距震群中心约200km的辽宁彰武发生了  $M_L 5.2$  地震,该序列对此次地震具有明显的前兆意义。2002、2004年海城2个地震序列的地震频次明显小于前3个序列,但丛集特点也比较突出,序列地震次数  $\geq 100$ ,最大震级  $M_{\max} \geq 3.5$ ,分别在序列发生后约15个月和发生当月在距震中约500、650km的内蒙古巴林左旗和东乌珠穆沁旗发生  $M_S 5.9$  地震,因此这2个序列在一定意义上都有前兆特征。2008年海城  $M_L 4.8$  地震序列不论在时空丛集上还是在震级强度上都大于2002、2004年海城地震序列,仅次于1999年岫岩地震序列,但从后续地震的发生情况看,序列周边3年内并未发生中强地震,因此属于普通地震序列。本文尝试在上述6个地震序列中寻找波形相似的“重复地震”,探讨利用“重复地震”特征对地震序列进行前兆识别的新思路。方法上主要基于“重复地震”现象可能反映震源附近岩石在外力作用下发生形变、破裂,宏观上可以检测到显著地震序列中出现波形高度相似的“重复地震”,即特定部位的小震高度集中,而微观上出现应力集中区域,这种现象可能比一般的地震序列反映出更多的前兆信息。

## 2 “重复地震”序列的识别

本文利用辽宁地震台网的数字地震波形记录,采用Schaff等(2004a)对“重复地震”的定义,即“地震对”至少在3个台站记录到的波形相关系数  $\geq 0.8$  作为识别标准(李宇彤等,2008)。“重复地震”序列即“多重地震”,即具有高度相似的波形和发震位置、震级和机制都

相似的一组地震。对“重复地震”序列的识别方法通常有 2 种,一种为相对“宽松意义”(Senso lato)上的标准,即组内任一地震事件只须与组内其他任一地震为“重复地震对”关系,即组合中的地震是单线关系,其优点是便于操作且可找到数目较多的组合,但也可能造成“近亲繁殖”;另一种“严格意义”(senso stricto)上的识别方法是指在组内的任一地震事件必须与组内其它所有事件均组成“重复地震对”关系,即要实现普遍联系。由于本文“重复地震对”的识别依据是不少于 3 个台站的波形互相关系数 $\geq 0.8$ 这种比较严格的定义,故此“重复地震”序列的识别采用“宽松意义”的定义方法。进行“重复地震”识别的具体方法为:首先挑选整个序列中波形完整、至少 3 个以上台站的波形记录可读取清晰的直达 P 波和 S 波震相到时的地震,对于辽宁数字化地震台网通常起始震级为  $M_L 1.8 \sim 2.0$ ;其次将所选地震两两组对进行波形相关计算的准备工作。

## 2.1 波形资料的预处理

对每个地震事件在台网截取波形的基础上,根据对应台站的观测报告中的震相到时截取波形,即初始位置设定为观测报告中 Pg 震相到时前 4s;而对于波列长度或持续时间的设定,由于包括整个尾波在内的区域地震波列长度随震中距的增加而增加,因此经验性地设定为 Sg 波和 Pg 波震相走时差的 4 倍,如此定义基本上可以包含全部尾波波列,同时也避免了后续噪声记录混入波列而影响相关系数的计算结果(蒋长胜等,2008)。考虑到仪器记录平坦频带范围的差异及环境噪声的影响,波形相关计算前需要对所截取的波形进行带通滤波,以获得频率域上的最佳分辨率。“九五”期间我国大部分地震台网存在甚宽带、宽带及短周期记录共存的情况,为了利用更多的台站记录进行“重复地震”的识别,本文对于地面和井下短周期 SP 记录选取 1.0 ~ 5.0Hz 带通滤波;对于宽带 BB 记录选取 0.5 ~ 5.0Hz 带通滤波。由相关系数与频率的依赖关系可以证明在此滤波范围内得到的相关系数相对比较稳定(Han et al,2012),采用两种地震仪混合带通滤波进行波形的互相关计算对识别结果的影响相对有限,不到识别总数的 10%(蒋长胜等,2008),其中“九五”期间建设的台网的观测资料中短周期记录占很大部分,这对于“重复地震”的识别至关重要,因此采用两种观测仪器混合滤波是目前符合工作实际的一种相对合理的现实选择。由于波形互相关计算要求“波列组对”逐点相互错动以求解最大相关系数,因此,实际参与计算的波形窗在此定义为选定波列前后各缩短 2s,即窗长为选定波列持续时间减 4s。

## 2.2 波形相关计算

识别和验证“重复地震”的最主要方法是首先计算波形互相关系数,再按照“重复地震”定义的识别阈值进行判定。本文计算 2 列地震波的波形相关系数  $\gamma$  时采用下列公式(Bath, 1974)

$$\gamma = \frac{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(d)}] [f_2(t) - \overline{f_2(d)}]}{\sqrt{\sum [f_1(t) - \overline{f_1(d)}]^2 \sum [f_2(t) - \overline{f_2(d)}]^2}} \quad (1)$$

式中,  $f_1(t)$ 、 $f_2(t)$  分别为同一台站记录的 2 个地震事件选定波列;  $\overline{f_1(d)}$ 、 $\overline{f_2(d)}$  分别是相应的平均值。在实际计算中,首先将波列  $f_1(t)$  固定为 Pg 震相到时前 2s 至选定波列结束前 2s,波列  $f_2(t)$  与  $f_1(t)$  同窗长,时间窗初始时刻为自其 Pg 到时前 4s 至 Pg 到时处,每次滑动 1 个数据点,分别计算相关系数并取极大值作为 2 个波列的最终相关系数结果。“重复地

震”的识别采用垂直向分量波形的相关系数 0.8 作为域值。

### 3 海城 - 岫岩 4 个显著地震序列的“重复地震”特征

由于辽宁地震台网经数字化改造后从 1999 年才开始产出数字化记录,因此本研究中海城 - 岫岩 6 个显著地震序列中的前两个序列是模拟记录,无法对其进行“重复地震”的识别,只有后 4 个地震序列能够满足波形相关计算条件。本文分别对这 4 个地震序列中的地震两两组对进行垂直向分量的波形相关计算,以识别“重复地震”。从严格意义上讲,“重复地震”事件在地震仪 3 个分量的记录都应该满足波形相关系数  $\geq 0.8$  的条件,但在实际操作中通常只用地震仪 1 个方向分量的结果,即垂直(UD)向的波形数据进行相关计算,而这忽略了震源周围介质的横向不均匀性。但根据李宇彤(2012)对海城 - 岫岩地区 1999 年 6 月~2000 年 6 月  $M_L \geq 2.0$  的 164 次地震进行随机组对的计算结果发现,3 个分量的相关系数是有微小差异的,结果显示地震对的垂直向相关系数显著小于水平向的相关系数,这说明在 3 个分量的波形记录中垂直向记录的相关系数最小。因此,为了兼顾可靠性和识别效率,本文只选择垂直向作为识别的判据。相关的地震事件组成的“重复地震”序列见表 2,各组“重复地震”波形见图 1、2。从表 2 及图 1、2 中可以清楚地看出同一组“重复地震”的波形具有高度的相似性。

表 2 海城 - 岫岩 4 个显著地震序列中包含的“重复地震”序列

序号	地震序列	“重复地震”个数 $n$	累积滑动量/mm
1	1999-11-29 岫岩 $M_s 5.4$ 地震前震序列	22	248.9
2	2002-04-30 海城地震前兆序列	4	89.3
3	2004-03-07 海城地震前兆序列	6	31.8
4	2008-11-14 海城 $M_L 4.8$ 地震序列	0	0

注:对滑动速率的估算与之前一些研究者(Li et al, 2007、2009)的方法类似,采用以下几个步骤:首先利用震级  $M_L$ ,采用公式  $\text{Log}M_0 = 16.1 + 1.5M_L$  (Hanks et al, 1979) 计算地震矩  $M_0$ ;然后在将地震应力降  $\Delta\sigma$  设定为常量(3MPa)的条件下,基于圆盘破裂模型估算地震的破裂半径  $r = (7M_0/16\Delta\sigma)^{1/3}$  (Kanamori et al, 1975);最后根据地震矩的定义来计算断层滑动量  $d = M_0/\mu\pi r^2$ ,其中取剪切模量  $\mu = 3 \times 10^{10} \text{N/m}^2$  进行计算。

表 2 中所列的 4 个地震序列中,1999 年岫岩地震序列、2002 年海城地震序列和 2004 年海城地震序列均为地震数  $n \geq 4$  的“重复地震”序列,只有 2008 年海城  $M_L 4.8$  地震序列中没有“重复地震”序列。有“重复地震”的 3 个序列发生之后在序列原地和周边有 5 级以上的中强地震发生,唯独没有“重复地震”的 2008 年海城地震序列在 3 年内周边没有发生中强地震,是 1 个相对独立的事件,属于普通地震序列,没有直接的前兆意义。同时 3 个“重复地震”序列产生的累积滑动量大小似乎与后续中强震发震距离有一定的相关性,其中 1999 年岫岩地震序列产生的累积滑动量最大,为 248.9mm,紧随其后的岫岩  $M_s 5.4$  地震几乎是在序列原地发生的;2002 年海城地震序列中“重复地震”数目虽然只有 4 个,但由于震级相对较大,产生的滑动量为 89.3mm,距后续发生在巴林左旗的  $M_s 5.9$  地震震中约 500km;2004 年海城序列的累积滑动量最小,仅为 31.8mm,距与其相对应的东乌珠穆沁旗  $M_s 5.9$  地震震中最远,约 650km(图 3)。

1999 年岫岩  $M_s 5.4$  地震的前震序列中“重复地震”个数最多的 1 组包括 22 个  $M_L \geq 1.8$

的小震,图 1 为营口台记录到的其中 20 个地震的波形。对其中每个地震进行滑动量的计算,其累积滑动量在  $M_s 5.4$  地震之前达到 248.9mm,并出现明显的滑动加速现象(图 4)。该序列从 1999 年 11 月 9 日开始至 29 日发生主震,其前震持续近 20 天,所得到的“重复地震”序列与前震具有相同的活跃时段,与另外 3 个序列相比“重复地震”数量最多,序列持续时间最长,并随时间的推移在主震前出现明显的加速现象等前震特征。

2002、2004 年海城 2 个显著地震序列从开始到周边发生中强地震之前,分别发生了 4 个和 6 个“重复地震”,其波形如图 2 所示。2002 年序列中的 4 个“重复地震”发生在同一天(2002 年 4 月 30 日),由 3 个 3 级水平地震和 1 个 2 级水平地震组成,累积滑动量为 89.3mm;2004 年序列中 6 个“重复地震”发生在 10 天之内,震级相对较低,其累积滑动量为 31.8mm。这 2 个序列被认为对内蒙古巴林左旗  $M_s 5.9$  地震和东乌珠穆沁旗  $M_s 5.9$  地震具有前兆意义。

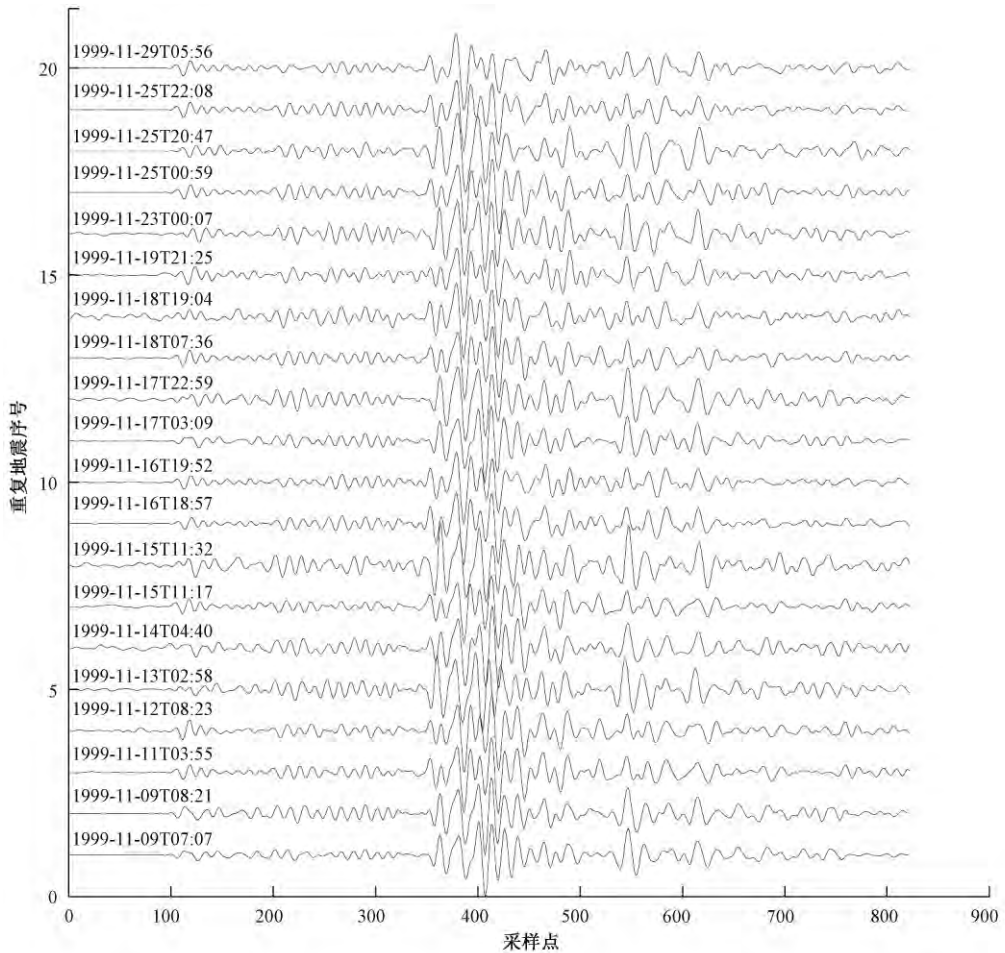


图 1 营口台记录到的 1999 年岫岩 5.4 级地震前序列中的“重复地震”波形图

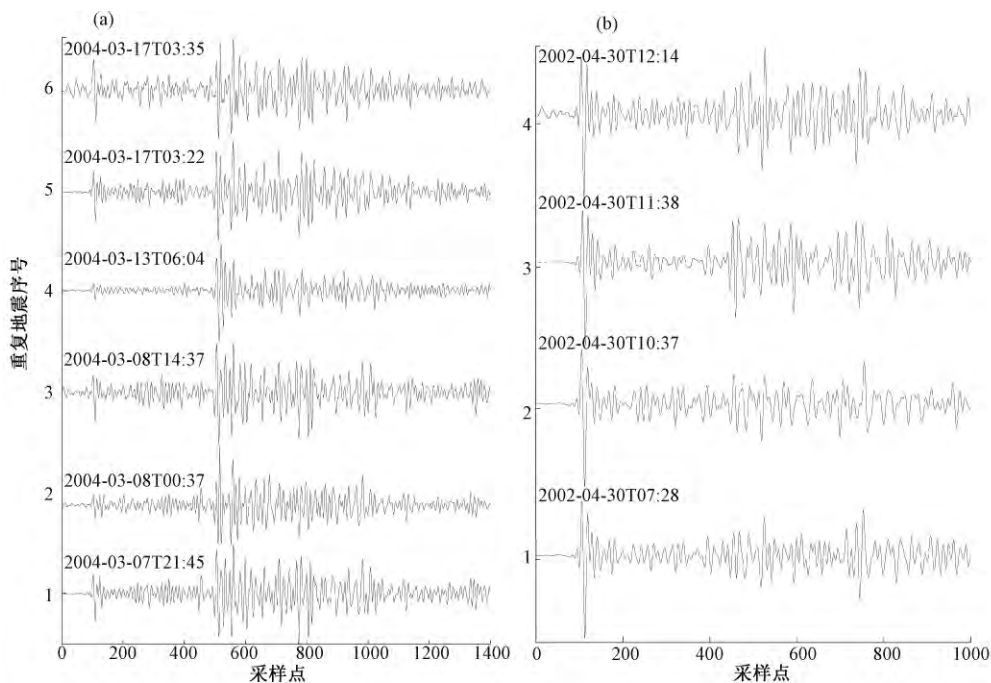


图2 2组序列中的“重复地震”波形图

(a) 岫岩台记录的2004年3月7~24日海城地震序列中的6个地震;

(b) 岫岩台记录的2002年4月30日海城地震序列中的4个地震

#### 4 结论与讨论

本文通过对海城-岫岩地区4个显著地震序列的“重复地震”特征进行研究后发现,1999年岫岩 $M_s5.4$ 、2003年巴林左旗 $M_s5.9$ 、2004年东乌珠穆沁旗 $M_s5.9$ 地震之前海城-岫岩地区发生的显著地震序列中都包含有波形高度相似的“重复地震”序列,其中1999年岫岩 $M_s5.4$ 地震序列中“重复地震”的数目最多,产生的累积滑动量最大,并在主震前出现明显的滑动加速现象,

主震在序列原地发生,因而该序列属于典型的前震序列。2002、2004年海城的2次显著地震序列在距震中约500、650km的内蒙古巴林左旗和东乌珠穆沁旗分别发生 $M_s5.9$ 地震,因此这2个序列在一定意义上属于前兆序列。只有在2008年海城地震序列中没有找到“重复地震”,并且3年之内在此序列周边也未发生中强地震,因而该序列没有短临和短期的直接前兆意义,属于普通序列。上述震例显示,包含“重复地震”的序列可能具有一定的前兆意义,通过对比3个序列产生的累积滑动量发现,其量值大小似乎与后续中强震在距离上有一

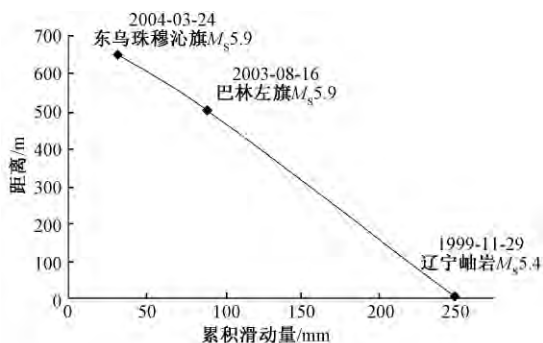


图3 3个“重复地震”序列的累积滑动量与后续发生的中强地震距离的关系

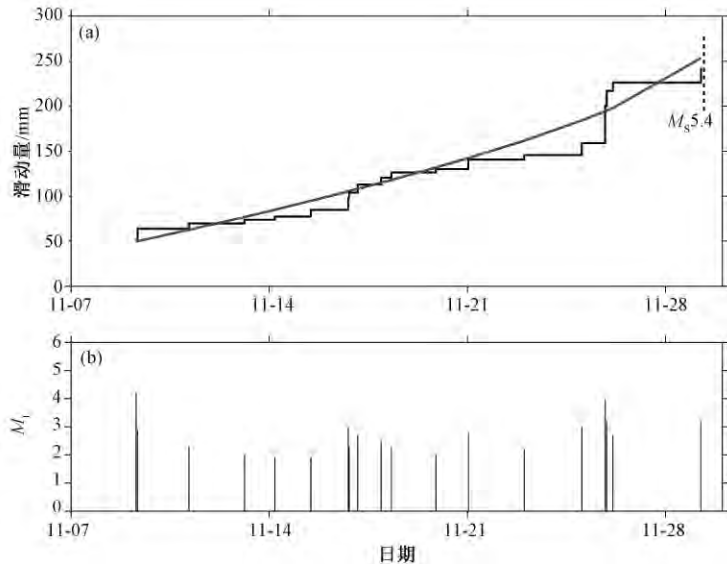


图4 1999年岫岩  $M_s5.4$  地震前震中的“重复地震”序列的累积滑动曲线(a)及  $M-t$  图(b) (据 Li 等(2011))

幂指数拟合曲线表现出加速滑动行为,其指数为  $m = 0.57 < 1$

定的相关性,并且累积滑动量越大,特别是当出现滑动加速现象时,原地发生中强地震的危险性似乎越高。

“重复地震”由于发震位置非常接近,破裂区域基本重合,因此可能反映孕震断层的一些活动特征。实验和理论研究表明,地震发生之前在断层的某一小区域或部位出现失稳,断层先出现缓慢滑动直至断层加速至动态破裂。因此,在地震之前就可能观测到源于震源或周边一连串随时间不断重复的信号,甚至是加速滑动现象。然而对于通过监测成核相揭示震前断层滑动失稳的观点也一直备受争议(Ellsworth et al, 1995),如果地震之前会发生滑动失稳,那么这种失稳是否大到可在真实地球环境中检测出来以及能否持续足够长的时间(Abercrombie et al, 1995),这些问题仅凭本文给出的4个震例来研究地震的重复性显然是不够的。但在一些特殊构造地区如海城-岫岩地区,具有一定地震“窗口”效应的“重复地震”的前兆意义可能表现得更加显著。鉴于海城-岫岩地区丰富的“重复地震”资源,在今后的地震预测实践中还需要不断积累更多的震例和经验。

**致谢:**感谢中国地震局地球物理研究所吴忠良研究员对“重复地震”方法的理论指导,感谢中国地震局地球物理研究所蒋长胜研究员在波形相关计算方面的帮助,感谢辽宁省地震局台网中心提供的数字地震波形资料和震相观测报告,感谢两位匿名审稿人对本文的指正和帮助。

## 参考文献

蒋长胜、吴忠良、李宇彤, 2008, 首都圈地区“重复地震事件”及其在区域地震台网定位精度评价中的应用, 地震物理学报, 51(3), 817~827。



- 李宇彤,2012.“重复地震”的若干地震学问题——1999年岫岩地震序列及辽宁区域台网的应用研究,博士学位论文,28~28,北京:中国地震局地球物理研究所。
- 李宇彤、吴忠良、蒋长胜等,2008,利用辽宁区域地震台网记录分析“重复地震”,地震学报,**30**(4),383~396。
- 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,中国科学:D辑,**40**(5),535~537。
- 彭汉书、吴忠良、蒋长胜等,2010,连续波形:数字地震台网的新前沿,中国地震,**26**(1),23~33。
- 薛丁、张建业、赵爱萍,2012,海城地震窗地震活动异常提取及其预报效能,地震学报,**34**(4),487~493。
- 张卫东、许世昌、刘旭东等,2003,前震序列型震群的识别方法及动态跟踪预报程式研究,东北地震研究,**19**(1),34~40。
- Abercrombie R E, Agnew D C, Wyatt F K, 1995, Testing a model of earthquake nucleation, *Bull Seism Soc Am*, **85**(6), 1873~1878.
- Báth M, 1974, *Spectral analysis in geophysics*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 87~94.
- Bouchon M, Karabulut H, Aktar M, et al, 2011, Extended Nucleation of the 1999  $M_w$  7.6 Izmit Earthquake, *Science*, **331**, 877~880.
- Ellsworth W L, Beroza G C, 1995, Seismic evidence for an earthquake nucleation phase, *Science*, **268**, 851~855.
- Hanks T C, Kanamori H, 1979, A moment magnitude scale, *J Geophys Res*, **84**, 2348~2350.
- Han L B, Wu Z L, Li Y T, et al, 2012, Cross-correlation coefficients for the study of repeating earthquakes: an investigation of two empirical assumptions/conventions in seismological interpretation practice, *PAGEOPH*, **171**(3), 425~437.
- Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa T, 2003, Repeating earthquakes and interpolate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone, *J Geophys Res*, **108**(B5), 2249.
- Johnson J H, Rejean S, Savage M K, et al, 2010, Anisotropy, repeating earthquakes, and seismicity associated with the 2008 eruption of Okmok volcano, Alaska, *J Geophys Res*, **115**, B00B04, doi:10.1029/2009JB006991.
- Kanamori H, Anderson D L, 1975, Theoretical basis for some empirical relations in seismology, *Bull Seism Soc Am*, **65**, 1073~1095.
- Li L, Chen Q F, Cheng X, et al, 2007, Spatial clustering and repeating of seismic events observed along the 1976 Tangshan fault, north China, *Geophys Res Lett*, **34**, L23309, doi:10.1029/2007GL031594.
- Li L, Chen Q F, Niu F L, et al, 2009, Slip rate along the Lijiang-Ninglang fault zone estimated from repeating microearthquakes, *Chinese Science Bulletin*, **54**, 447~455.
- Li Y T, Wu Z L, Peng H S, et al, 2011, Time-lapse slip variation associated with a medium-size earthquake revealed by “repeating” micro-earthquakes: the 1999 Xiuyan, Liaoning,  $M_s = 5.4$  earthquake, *Nat Hazards Earth Syst Sci*, **11**, 1969~1981.
- Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V, 1995, Clustering and periodic recurrence of microseismicities on the San Andreas fault at Parkfield, California, *Science*, **267**, 503~507.
- Pandolfi D, Bean C J, Saccorott G, 2006, Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999  $M = 3.6$  event at Mt Vesuvius, *J Geophys Res*, **33**, L06306.
- Rubin A M, 2002, Using repeating earthquakes to correct high-precision earthquake catalogs for time-dependent station delays, *Bull Seism Soc Am*, **92**, 1647~1659.
- Schaff D P, Beroza G C, Shaw B E, 1998, Postseismic response of repeating aftershocks, *Geophys Res Lett*, **25**, 4549~4552.
- Schaff D P, Richards P G, 2004a, Repeating seismic events in China, *Science*, **303**, 1176~1178.
- Schaff D P, Richards P G, 2004b, Lg-Wave Cross correlation and double-difference location: application to the 1999 Xiuyan, China, Sequence, *Bull Seism Soc Am*, **94**, 867~879.
- Templeton D C, Nadeau R M, Bürgmann R, 2008, Behavior of repeating earthquake sequences in central California and the implications for subsurface fault creep, *Bull Seism Soc Am*, **98**(1), 14.
- Vidale J E, Ellsworth W L, Cole A, et al, 1994, Variations in rupture process with recurrence interval in a repeated small earthquake, *Nature*, **368**, 624~626.
- Wiens D A, Snider N O, 2001, Repeating deep earthquakes: evidence for fault reactivation at great depth, *Science*, **293**, 1463~1466.

## The precursory significance of cumulative slip of repeating earthquake sequences prior to moderately strong earthquakes

—A case study of 4 remarkable earthquake sequences of Haicheng–Xiuyan

*Li Yutong Zhang Bo Wang Liang Li Tongxia*

Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China

**Abstract** The Haicheng–Xiuyan region is an earthquake-prone area in Liaoning Province where earthquake sequences occurred frequently and is regarded to the regional seismic window. In this area we found many earthquake events with the highest waveform similarity in the records of the same station from some remarkable seismic sequences, namely repeating earthquake sequences. In principle rupture areas of the repeating events overlap with each other and are the most closely located. Therefore, these events may reflect the seismic process near the earthquake fault. In this paper, we identified 4 remarkable earthquake sequences of Haicheng–Xiuyan by waveform cross-correlation. The result shows that the cumulative slip of repeating earthquakes is related with moderately strong earthquakes, among which Xiuyan  $M_s 5.4$  foreshock sequences has the most strong and apparent pre-shock accelerating-like slip behavior.

**Key words:** Earthquake sequence Repeating earthquake Waveform correlation  
Haicheng–Xiuyan