

李宇彤、蒋长胜 2011 波形相关意义“重复地震”研究综述,中国地震 27(4) 335~347。

· 研究综述 ·

波形相关意义“重复地震”研究综述

李宇彤^{1 2)} 蒋长胜²⁾

1) 辽宁省地震局,沈阳市皇姑区黄河北大街 44 号 110034

2) 中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

摘要 波形相关意义的“重复地震”在自然界中普遍存在,其数量远远超过我们的预期。近年来由于数字地震观测技术的普及和发展,有关“重复地震”的研究引起越来越多的关注。目前“重复地震”研究已被广泛应用于检测地壳介质性质变化、评估地震台网的定位精度、地震“复发”和断层深部滑动速率的估算等方面,在提高定位和震相识别精度、断层结构、震源物理及地震预测研究等方面也都显示出值得关注的应用潜力。本文对有关“重复地震”的最新研究及应用成果进行了总结和归纳。

关键词: 重复地震 波形相关 地壳介质变化 评估定位精度 断层深部滑动速率

[文章编号] 1001-4683(2011)04-0335-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

“重复地震”(repeating earthquakes)的概念很早就被提出(Isacks et al,1967; Geller et al,1980),但到目前为止尚无统一的定义。“重复地震”的名称有“地震对”(earthquake doublets)、“相似地震”(similar earthquakes)等。广义上的“重复地震”是指一个地区在某一时期内多次发生的强震,按照空间分布可分为原地重复、带内重复和构造重复等(国家地震局震害防御司,1990),此外也被用描述人工震源产生的波形相似的地震。而本文所指的波形相关意义的“重复地震”是指符合波形互相关条件的天然地震对或由这些地震对组成的“多重地震”组,即要求“重复地震”的波形具有高度的相似性,属于更加严格的数字地震学范畴的概念。目前虽然不同研究者给出的定义有所不同,但其本质都是具有高度相似性的波形,其名称的不统一也反映出目前这一领域的相关研究还处于发展之中。

“重复地震”的地震波在相同台站组合的传播路径基本相同,这一特点在检测地下介质的性质随时间变化方面(Poupine et al,1984; Nakamura et al,2002; Niu et al,2003; Schaff et al,2004; Snieder et al,2004; Grêt et al,2005; Pandolfi et al,2006; 林建民等,2006)显示出独特的

[收稿日期] 2011-09-26

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH1006)资助

[作者简介] 李宇彤,女,1967年生,博士研究生,辽宁省地震局高级工程师,主要从事地震预测研究。

E-mail: lyt510530@163.com

应用潜力。在一些地区存在大量的由多个重复地震对组成的“多重地震”(multiplets)或称“重复地震序列”(repeating earthquake sequence),为地震“复发”和估计深部断层滑动速率等方面的研究提供了新的途径(Vidale et al, 1994; Nadeau et al, 1995, 1999; Wiens et al, 2001; Igarashi et al, 2003, Templeton et al 2008)。利用“重复地震”的走时差定量地判断地震目录中震相的拾取误差(Schaff et al 2004a)可以对地震台网的定位能力进行评估,这对改善台网监测能力具有重要的现实意义(Rubin, 2002; Schaff et al, 2005; 蒋长胜等, 2005; Richards et al, 2006)。“重复地震”还用于识别“淹没”在前震、主震和余震中的大量微震,从而有效提高微震识别能力(Vidale et al 2003; Yang et al 2009; Schaf 2010; Bouchon et al, 2011)。“重复地震”也越来越多地应用于解释断层结构和震源物理方面的研究,越来越多的研究发现,“重复地震”在大震之后的重复间隔及由重复破裂产生的地震矩的变化与震源深度、孕震区域和成核尺度等具有相关性(Vidale et al, 1994; Nadeau et al, 2004; Schaff et al, 1998; Lin, 2004; Zhao et al 2008; Uchida et al, 2007; Chen et al, 2010a; Rubinstein et al, 2010; Chen et al 2007; Matsubara et al, 2010),并已广泛应用于解释断层运动的物理过程。随着研究的不断深入,“重复地震”必将显示出更为广阔的应用前景。

1 “重复地震”的基本概念

1.1 波形相关概念的不确定

虽然用于确认“重复地震”的波形互相关技术已有较长的历史(Poupinet et al, 1984; Ito, 1985; Frémont et al, 1987; Deichmann et al, 1992; Got et al, 1994; Dodge et al, 1995; Nadeau et al, 1995; Shearer, 1997; Lees, 1998; Philips, 2000; Moriya et al, 2003),但直到现在,有关“重复地震”的概念仍有很多不确定性。Poupinet等(1984)将两个发生在同一位置,并且在同一台站具有高度相似波形的地震事件称为“重复地震”。Rubin(2002)定义“重复地震”为空间位置、波形和震级都具有较高的相似性的两次或多次地震事件。Schaff等(2004a)对“重复地震”的定义则是从操作角度进行的,他们将“重复地震对”定义为一对地震事件被至少一个台站记录到的波形相关系数不小于0.8。识别和验证“重复地震”的最主要的方法就是计算地震波列的波形互相关系数,计算要求“波列组对”逐点相互错动以求解最大相关系数,在实际操作中,参与计算的波形窗、滤波方式等都会对相关系数的计算结果产生影响。对于计算窗口的选择要考虑到记录的信噪比,如区域记录被设定为 S_g 和 P_g 震相走时差的4倍(蒋长胜等, 2008),这样的定义基本可以包含全部尾波波列,同时可避免后续噪声记录混入波列而影响相关系数的计算结果。Schaff等(2004a)将远震记录的计算窗口选为从P波前5s取到 L_g 波后40s的220s窗口,利用震幅相对较大又具有多次散射的 L_g 波的高度相似性,最大程度地放大区域波形,同时因 L_g 波的传播速度比P波和 S_n 波的小,故而减少了由于距离和走时所产生的不确定性。对地震波形进行预处理时采用0.5~5.0Hz的带通滤波(Schaff et al, 2004a, 2004b; Schaff 2010;)或1~10Hz的带通滤波(Li et al, 2007; 李乐等, 2008),应取决于台站仪器响应情况。

到目前为止,有关“重复地震”波形相关系数选择的阈值、识别所需的台站数量、波形相关计算所选用的频带范围(Schaff et al, 2005)等限定条件还没有统一的规定,因此波形相关意义的“重复地震”的定义还带有一定的主观性。同时我们发现,不同的观测系统对“重复

地震”的识别结果也有很大差异(蒋长胜等 2008; 李宇彤等 2008), 其中的影响因素也很复杂, 如“地震对”震源之间的差异、各向异性速度结构在描述震源区的适用程度(Nakahara, 2004) 等因素, 都需要综合考虑。Menke 等(1990) 以及 Hough 等(1996) 的研究表明, 波形相关系数随“地震对”之间距离的增加呈指数衰减。Geller 等(1980) 在美国加州的 Calaveras 断层和 San Andreas 断层上发现小震的复发现象, 由波形高度相似理论推断“重复地震”震中位置间的差异约为 $1/4$ 优势波长。

1.2 产生机理的不确定

Nadeau 等(1995) 在 San Andreas 断层上发现具有稳定时间间隔的波形高度相似的“重复地震”, 认为这些小的“重复地震”是断层上小面积凹凸面上无震滑动激发的(Nadeau et al, 1998), 即在大的蠕变区内较硬的凹凸体的重复破裂, 滑动速率约 0.023cm/a , 从而推断存在相当高的应力降。Anooshehpour 等(2001) 则对这些重复事件给出另一种解释, 认为它们是在大的闭锁区内包含的凹凸体, 由于闭锁区内存在速度屏蔽, 因而从几何学角度看所产生的局部滑动速率远小于整体上观察到的蠕变速率, 实际上的动态应力降应与使凹凸体整体破裂的程度相当。Beeler 等(2001) 则提出一个简单的粘滑和蠕滑模型, 认为重复事件的间隔期存在明显的无震滑动, 从而导致较低的应力降。“重复地震”除了由于断层的持续滑动而引起的机制外, 火山爆发活动也可以提供重复震源。目前已发现多例通过岩浆等流体导致的震群(swarm) 中包含了大量的“重复地震”, 通常可从中找出多个波形高度相似的事件, 人们正试图通过尾波干涉等方法研究这些“重复地震”的微小变化, 用以预测火山的喷发(Pandolfi et al 2006; Johnson et al 2010)。

有关“重复地震”的复发时间与地震矩比例关系的观测结果也非常有趣。Nadeau 等(1998) 通过研究 San Andreas 断层上的“重复地震”, 提出了关系式 $T \propto M_0^{0.17}$ 。Chen 等(2007) 在对其它断层的研究中也对此进行过确认。Sammis 等(2001) 认为“重复地震”是发生在大的闭锁区和蠕变区相接处的弱的凹凸体上, 给出 $T \propto M_0^{\frac{1}{6}}$ 的关系, 并对产生低应力降的原因进行了解释。Chen 等通过(2009) 实验室模拟有震滑动和无震滑动各占一定比例的条件, 成功再现了实际观测结果, 提出在速度弱化段模拟滑动值时要考虑到累积无震滑动的的影响才能使模拟结果与“重复地震”观测值相对应的应力降基本一致, 这一观点在对日本东北地区板块边界分布的重复微震研究中也得到认可(Schmidt et al, 2005; Uchida et al, 2007)。

Schaff 等(2004a) 在研究中国大陆“重复地震”时认为, 间隔较小的“重复事件”可能是静态或动态应力传输或是孔隙流体效应造成的, 而间隔较大的可能是断层上的凹凸体、障碍物蠕变激发产生的。中等地震之后震源或附近的“重复地震”间隔明显变小, 随着时间的流逝, 间隔又逐渐加大, 这些现象说明“重复地震”与主震的触发作用有关(Chen et al, 2010b)。关于“重复地震”产生的机理及准周期性, 不同研究者用不同模型和数值模拟实验加以解释(Ariyoshi et al, 2007; Cheng et al 2007)。Chen 等(2010a) 利用三维连续断层模型给出的模拟结果与不同深度上观测的“重复地震”的发震间隔 τ_r 与地震矩 M_0 的关系基本一致, 在模型中“重复地震”发生在高速断层体的低速区内, 发震间隔 τ_r 与地震矩 M_0 在震后的变化关系是成核尺度和低速区半径的函数。Dreger 等(2007) 对 2004 年发生在 San Andreas 断层上的一组横跨 $M_w 6.0$ 主震的“重复地震”序列也做过相关研究, 他们利用有限

元方法反演应力降同样得到重复微震破裂区域、速度及应力降的关系。

2 “重复地震”现象的普遍性

在近年来的观测实践中发现,天然地震中波形相关意义的“重复地震”事件不仅仅是发生在板块边界地区,大陆地区的出现比例也超出人们的预期。越来越引起广泛关注的“重复地震”已遍及断层蠕变区(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)以及大陆等地区(Schaff et al, 2004a、2004b; Li et al, 2007、2009; 蒋长胜等, 2008; 彭汉书等, 2010)。与板内“重复地震”相比,发生在板缘的“重复地震”不仅数量更多,研究成果也令人瞩目。“重复地震”现象在日本(Matsuzawa et al, 2002; Igarashi et al, 2003; Yamawaki et al, 2004; Matsubara et al, 2006; Uchida et al, 2007)、智利、墨西哥、美国加州及阿拉斯加(Nadeau et al, 1998、1999)、菲律宾海(Kimura et al, 2006、2009)、中国台湾(Chen et al, 2007、2008、2009; Rau et al, 2007)、甚至在南极冰川出口(Danesi et al, 2007)等地都有相关报道。其中著名事件如美国加利福尼亚州沿圣安德烈斯断层(San Andreas fault)两侧的帕克菲尔德地区在1922、1934和1966年相继发生的3次5.5~6.0级地震的波形十分类似,同时在该地区还发现有多组类似等间隔的小量级“重复地震”(Nadeau et al, 1998)。

中国大陆地区是目前板内“重复地震”研究相对较多的地区,从Schaff等(2004a)利用远震记录的研究已转为更多的国内研究者(Li et al, 2007、2009; 蒋长胜等, 2008; 李宇彤等, 2008; Li et al, 2011)利用震中距更近、台站密度更大、更均匀的区域台网地震波记录研究中国大陆的“重复地震”。Schaff等(2004a)发现,“重复地震”约占统计总数的10%,而这一比例在之后对大震余震区的研究中出现明显增高的情况,如Li等(2007)对唐山老震区的研究中发现53%的地震都可找到相似地震;蒋长胜等(2008)对首都圈地区的研究结果为24%;Li等(2011)对辽宁海城-岫岩地区的研究结果为23%。上述中国大陆不同地区“重复地震”的研究结果表明,板内“重复地震”具有相当的普遍性,其数量远远超过之前的预期,这大大提高了“重复地震”的应用价值和前景。最新研究发现,大震之前在震源处的地震信号中存在大量的“重复地震”,大震的余震之中也检测到大量的淹没在尾波中的“重复地震”,如伊兹米特 M_w 7.6地震(Bouchon et al, 2011)。随着波形识别技术的不断提高,可以发现更小量级的重复微震, Schaff(2010)对岫岩1999年 M_s 5.4地震序列中的90个地震利用波形相关检测方法与标准短时平均窗/长时平均窗方法(STA/LTA)相比较,其识别能力可提高1.3个震级单位,这不仅可对传统余震目录进行有效补充,同时也使低震级“重复地震”的识别比例随之提高,使“重复地震”的应用领域不断扩展。

3 “重复地震”的应用方向

3.1 检测地下介质性质的变化

Poupinet等(1984)利用天然“重复地震”事件的相似性,分别考察了1979年美国加州凯奥特湖 M 5.9地震前后的重复地震对。通过对比地震对的波形特征,提出一种测量地壳介质波速随时间变化的方法,从而大大提高了测量精度,其中单一地震台站的波形图可以检测到S波波速0.1%以上的变化,更精确的数字观测系统可以检测到P波和S波波速0.01%

的变化。Nakamura 等(2002)利用发生在1998年9月Shizukuishi镇M6.1地震前后震源边缘的两次定点人工爆破的走时变化,发现沿一个破裂方向的直达P波走时上升了大约1%,而沿另一方向的波速则出现下降的现象,反映出地震后不同破裂方向介质变化的差异性。Niu 等(2003)利用“重复地震”给出1987~1997年Parkfield地区San Andreas断裂在深度3km处结构的变化情况,推测地震断裂带形变场结构是随时间而变化的,这种变化可能是由于裂隙流体移动引起的地下应力的重新分布。

Schaff 等(2004)认为“多重地震”(multiplets)的震源和传播路径是近似相同的,地震波存在的差异来源于介质的变化。通过对1989年Loma Prieta地震和1984年Morgan Hill地震余震区的研究,发现了20组“多重地震”中早期S波和尾波在震后出现的震相延迟高达0.2s。对于同震的路径P波延迟幅度降低1.5%,S波波速降低3.5%,由于S波明显大于P波的变化幅度,从而推测这种变化可能是由于裂隙内的流体作用导致的,意味着速度变化的震源区内可能存在低的有效压力,这种变化主要发生在台站附近和浅层,也不能排除发生在深层的可能。如果变化在浅层,推测是主震产生的强地面运动的非线性影响,如果在深层则可能缘于孕震区内存在较高的孔隙压力,并在孕震过程中起到关键作用。

Snieder 等(2004)、Grêt 等(2005)利用多次散射波放大地下介质的微小变化,采用尾波干涉法监测南极埃里伯斯火山的瞬态变化。火山爆发活动提供的重复震源沿极为松散的火山介质传播,通过研究1999年12月~2000年2月间持续2个月的喷发活动信号,发现在整个喷发期间地震图像的开始部分高度重复。在第1个月里尾波部分也是如此,但再过了一段时间后,地震尾波在几天的时间内变得不相关,这表明火山散射特性的快速变化。Pandolfi 等(2006)利用“重复地震对”和尾波干涉方法的研究发现,经过意大利西南部的维苏威火山(欧洲大陆唯一的活火山)的地震波速存在0.4%左右的微小变化。Johnson (2010)利用多重“重复地震”研究火山岩浆喷发前后的变化,用以尝试预测火山的喷发。

Zhang 等(2005、2008)利用穿过地核的“重复地震”的走时变化,证实了地球内核与外核之间的旋转速度具有差异性。Roberts 等(1991、1992)在实验室中利用人工重复地震精确测定试验介质中的波速与衰减特性随温度的变化。周龙泉等(2007)利用射线追踪方法进行归一化处理得到大姚地区“重复地震”现象,观测到该地区地壳介质随时间的变化。利用“重复地震”观测地壳介质随时间变化这一思想应用于主动源探测更为方便,林建民等(2006)通过野外试验对人工“重复地震”的潜在应用前景进行了分析,并对提高人工“重复地震”方法的可靠性与可行性进行了详细探讨,为进一步利用人工源“重复地震”进行大尺度的地震探测奠定了基础。

3.2 估算深部断层的滑动速率

对由大量重复发生的小的相似地震组成的“重复地震”序列复发间隔的研究可推断出深部断层的滑动速率,为研究地下应力场的变化和描述断层活动提供了新的途径。Matsuzawa 等(2002、2004)在日本东北部消减带发现很多小的“重复地震”,这些地震被认为是位于板块边界的障碍体的多次重复破裂引起的。利用这些小的“重复地震”数据,可以推断板块边界准静态滑动的时空分布。在大多数的板内地震之后震源周边地区伴随着大量的震后滑动,这些震后滑动有时会引起其它地区发生大的地震,对于研究大障碍体的破裂状态具有非常重要的意义。Uchida 等(2003a、2003b)利用“重复地震”估算出日本东北部Sanriku(三陆)沿海板块边界准静

态滑动的时空分布。这些事件是由稳定滑动区域内小的障碍体重复滑动产生的,假设将这些事件作为埋入板块边界的蠕变仪,结果显示板块边界深部滑动速率几乎是非常稳定的,已发生的6级以上地震在其周边地区会伴随断层的准静态滑动。Uchida等(2005)对日本东北部 $M_{4.8} \pm 0.1$ 地震复发周期的研究中发现,大地震发生后“重复地震”的重复周期会随着大震发生时间的离逝而变长,说明重复周期随时间、空间的变化与局部断层的特性以及破裂过程相关。Uchida等(2006)利用小的“重复地震”的时空分布估算2005年日本东北地区宫城县7.2级地震周边断层的准静态滑动过程,发现此次地震震源周边板块边界的绝大部分地区仍然处于闭锁状态。Matsubara等(2005)对2003年日本北部Off-Tokachi地震震源区内的“重复地震”进行分析,发现板块边界的移动与“重复地震”之间具有相关性。在余震区及周边识别出由666个地震事件组成的251组多重地震中,发现主震之前这一区域有少量“重复地震”分布,而主震之后发生了大量的重复事件,并位于震后滑动区内呈NE向分布,同震区的东部和东南部在震后3个月内大约出现0.5m的滑动,而在震前3年的累计滑动不到0.05m,这些近海震后滑动数据弥补了陆上GPS观测覆盖面的不足。

Rau等(2007)在研究台湾东部Longitudinal Valley断层北部地区时发现25个震级在 M_L 2.1~4.6的重复事件。这些重复地震事件震源深度在10~22km之间,滑动速率为24.9~77.5mm/a,与GPS反演的相同深度范围内的滑动速率 47.5 ± 5.8 mm/a基本一致。从基于GPS得到的滑动逆差分布来看,1951年以来LVF断层北部未来将要发生的应变释放应相当于一次 M_w 7.3地震。Chen等(2009)在Longitudinal Valley断层上同样发现2组大的“重复地震”序列,位置在池上(Chihshang)段以南,花莲(Hualien)段以北,分布呈NNE方向,长达45km,而在Chihshang段沿断层走向延伸较短,约15km,“重复地震”在Hualien段较长的空间延伸说明深部可能存在一个较长的蠕变带。Chen等(2008)利用“重复地震”研究了台湾东部陆弧碰撞交界地区池上(Chihshang)断层的滑动速率,推断出断层从北至南的滑动行为,北部表现为蠕变行为,南段局部出现闭锁的地震危险性在增强,这一判断与之后2003年发生的 M_6 地震的结果相一致。

“重复地震”的分布与菲律宾海板块削减带密切相关,并可通过清晰地勾勒出板块的基本轮廓(Kimura et al, 2006, 2009; Uchida et al, 2010),而精确限定板块的最新形状。利用“重复地震”限定的千叶周边的板块的几何形状显示出关东地区东部的几何形状相当平直,说明千叶地表下部与太平洋板块碰撞可能是造成菲律宾板块隆升的主要原因。Igarashi等(2003, 2010)发现日本东北部与菲律宾俯冲板块和太平洋俯冲板块相接处的“重复地震”所表现出的滑动速率明显不同,从而推断板块间耦合连接特征的时空动态变化情况。

Li等(2007)从唐山地区识别的多重相似地震组中经过精确辨识得到一组准周期的“重复地震”,估算在地表以下约15km处的断层滑动速率约为2.6mm/a,这一结果和地表GPS观测结果相符,可能反映的是真实的构造运动。李乐等(2008)用云南数字地震台网的波形资料研究丽江-宁蒗地区的地震活动和深部滑动速率,估算该区深部约23km处的滑动速率约为5mm/a,同样与GPS资料结果相符。由此可见,“重复地震”的优势是GPS和InSAR等地表或空间观测技术所无法取代的。

3.3 评估和提高台网的定位精度

Schaff等(2004a)对中国大陆及邻区具有3个或以上台站记录的“重复地震”事件的重

新相对定位结果显示,“重复地震对”间距确实在 1km 范围内。Geller 等(1980)认为“重复地震”震中位置间的差异约为 $1/4$ 优势波长。Baisch 等(2008)利用二维人工合成波模拟横向非均匀介质内波的相似性与震源之间距离的关系,结果同样表明地震波形在限定窗长内的一定相关阈值条件下,合成波和相似的实际地震间距之间满足 $1/4$ 优势波长准则。Schaff 等(2004a)利用远震波形记录识别出中国大陆及周边地区的“重复地震”,给出 1987~2000 年 $M \geq 3.0$ 的重复事件 1301 个,组成 950 对“重复地震”,约占统计地震总数的 10%。由于复杂的多次散射,地震波高度的相似性要求两次事件相距不超过优势波 L_g 波长的 $1/4$,即不超过 1km,据此对《中国地震年报》中震相拾取误差和定位误差进行了定量估计。蒋长胜等(2005)利用 Schaff 等(2004a)给出的中国及邻区“重复地震对”结果,根据上述假设推断,地震台网实测得到的两个重复事件之间的距离 X 即是地震台网的定位误差,据此估计中国地震台网的定位精度分布。结果显示,中国台网的定位误差平均为 10km 的数量级。 X 值的空间分布显示青藏高原、新疆西部和北部、内蒙古东部等地区是定位精度需要改善的地区。在上述工作基础上,蒋长胜等(2008)利用首都圈台网 107 个数字化台站的波形资料对首都圈地区 2002~2006 年发生的地震事件进行相关计算,识别出 895 例“重复地震事件”,约占计算总数的 24%。利用这些事件对首都圈台网定位精度的估计结果显示,观测条件较好的首都圈东北部地区平均定位精度约为 5km,而西南部地区约为 13km,是观测条件有待改进的地区。

对“重复地震对”波形的互相关计算可以改进震相拾取初至到时的精确性。“重复地震对”既可被用来经验性地估计报告的定位误差,还可以用来对震相拾取误差定量化。因为双震位置相近,速度各向异性带来的未知走时扰动是共同的,这些影响可以通过走时差去除,结果仅由拾取的不确定性造成的误差。Schaff 等(2004b)对 1999 年岫岩地震序列中 90 个地震事件中的 28 个地震做互相关计算处理后,其中 L_g 震相拾取误差由原来的几十秒误差降为 0.005~0.01s,相当于提高 3 个数量级。因此,在相对定位方面,这样极佳的结果使得定位精度可达几百米的数量级。利用波形互相关得到如此高度精确的走时差用于双差定位反演震中位置的定位精度可达 150m。利用 L_g 波定位有 2 个最基本的优势,其一它可以最大程度地放大区域波形,从而能够监测到小的地震事件;其二它的传播速度比 P 波和 S_n 波慢,减少了由于距离和走时所产生的不确定性。进行“重复地震”识别的波形相关技术用于测量地震对之间相对走时差精度可以达到 $1/10$ 个采样点,大大提高了精定位后地震分布图像的质量。目前利用“重复地震”大幅度提高定位精度的工作已成为可能,并在核爆炸地震监测、地震预测研究等方面显示出值得关注的发展前景(Dodge et al, 1995; Nadeau et al, 1995; Shearer, 1997; Lees, 1998; Rubin et al, 1999; Phillips, 2000; Schaff et al, 2002、2005; Moriya et al, 2003; Matsumura, 2010)。

3.4 提高对前震和余震的识别能力

一些较大地震之前和之后在震源及附近发生的微震的波形具有较高的相似性,因此对这些“重复微震”的识别可以发现主震前识别窗口很难用视觉分辨的、发震间隔很小的前震或主震后因尾波干扰而“淹没”的大量余震(Vidale et al 2003; Peng et al, 2006、2007、2009; Yang et al 2009; Schaff 2010; Bouchon et al, 2011)。我们知道,对余震过程的认识常常可以为地震预测研究提供重要线索,并可直接应用于强余震趋势的估计。Schaff(2010)基于“重

复地震”概念的相关性检测方法的识别能力可提高 1.3 个震级单位,相当于把探测到的微震事件的数目提高了几倍。Peng 等(2009)利用“匹配滤波检测技术”(matched filter technique),即利用计算机自动对连续地震记录进行扫描,可识别出传统方法难以发现的波形相似的微震事件。他们发现 2004 年 Parkfield 地区 6 级地震沿 San Andreas 断层上分布的余震数目要比之前的观测高出 11 倍,这无论是从地震构造角度还是地震监测预测研究的角度来看,都具有重要意义。

1999 年发生在土耳其伊兹米特(Izmit)的 M_w 7.6 地震是一次记录最为完整的事件之一,震前出现持续时间较长的源于震源的地震信号中包含一连串的地震破裂,破裂随时间及低频地震噪声的增加而加速。鉴于这些事件的波形几乎相同,因而可以利用其中一次事件作为模板,去检测那些信号淹没在噪声之中的相似事件。这一过程是通过模板与记录的互相关来实现的,结果检测到比直观识别多得多的事件,由原来识别的 5 次事件上升到 40 个重复事件(Bouchon et al 2011)。随着微震探测能力的提高,可以识别出大震前大量的重复微震信号,前震现象的比例也在不断提高。倪四道等(2010)发现在 2010 年 4 月 14 日玉树 7.1 级主震之前存在几十个波形十分相似的前震,地点非常接近,对这些波形所携带的信息进行进一步研究,对于主震成核期、大震前的不稳定滑动或出现滑动加速等前兆现象的判断都有具有十分重要的意义。

由于微震在地震图上的到时信号较弱及其突发性原因,用一般的到时分析方法很难给出这些事件的精确定位。然而,由于“重复地震”在各个单台上记录到的地震波形的相似性,用波形互相关技术即可得到相对精确的事件位置。Shearer(1998)利用上述方法对 1989 年间近一个月内南加州橡树岭发生的一组约 50 个微震($M \approx 1.5$)的震群进行重新定位,其标准误差一般小于 50m,这成为确定南加州橡树岭地下 18km 深处存在断层的小震丛集证据。Cassidy 等(2000)同样是利用识别“重复地震”的波形互相关技术对微震进行重新定位,更精确地判定活动断层的位置,可见“重复地震”方法已成为提高微震识别能力和地震定位精度的有效工具。

4 讨论

被广泛应用于检测地下介质性质变化、评估地震台网定位精度及断层深部滑动速率的波形相关意义的“重复地震”,在提高震中定位和震相识别精度,进行断层结构、震源物理及地震预测研究等方面具有值得关注的应用潜力。利用“重复地震”也为一些理论问题的研究开启了新的角度,如用于断层愈合(Vidale et al,1994; Marone et al,1995; Peng et al,2005、2007; Wu et al,2008)的研究为确定断层带的“力学性能”、揭示断层带的地震行为又是一重要约束。Wiens 等(2001)观测到的深源重复地震可能使“转换断层”力学机制模型的解释更接近于现实。更值得一提的是,“重复地震”在对内外核旋转速度差异现象的发现(Song et al,1996)和证实等重大基础科学问题的研究中发挥了重要作用(Zhang et al,2005、2008)。

与波形相关技术密不可分的“重复地震”,甚至让一些地震学家提出“高精度地震学”(high-precision seismology)的概念。但是到目前为止,有关“重复地震”的很多概念仍然是经验性的,甚至是不确定的。然而随着数字地震台网的发展、数字地震观测资料的积累和宽频带地震波形分析技术的进步,越来越多的“重复地震”将被发现,这一领域在地震学研究中

将占有更加重要的地位,应用也会越来越广阔。由于收集的文献有限和篇幅限制,这里介绍的仅仅是“重复地震”应用领域的一些侧面,还有许多相关认识需要实际资料的进一步检验,这不仅在地震观测及观测资料的解释上,而且在一些地震学基本问题的研究中都是十分重要的,随着“重复地震”应用领域的不断拓展,它的应用前景更是令人期待。

致谢:感谢中国地震局地球物理研究所吴忠良研究员的建议、鼓励和指导。

参考文献

- 国家地震局震害防御司,1990,地震工作手册,334~335,北京:地震出版社。
- 蒋长胜、吴忠良,2005,由“重复地震”给出的中国地震台网的定位精度估计,中国地震,21(2),147~154。
- 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。
- 李乐、陈棋福、钮凤林等,2008,利用“重复地震”估算丽江-宁蒗断裂带的深部滑动速率,科学通报,53(23),2925~2932。
- 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。
- 林建民、王宝善、葛洪魁等,2006,重复地震及其在人工探测中的潜在应用,中国地震,22(1),1~9。
- 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:地球科学,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。
- 周龙泉、刘桂萍、马宏生等,2007,利用重复地震观测地壳介质变化,地震,27(3),1~9。
- Anooshehpour A,Brune J N,2001,Quasi-static slip-rate shielding by locked and creeping zones as an explanation for repeating earthquakes at Parkfield,Bull Seism Soc Amer,91,401~403。
- Ariyoshi K,Matsuzawa T,Hino R,et al,2007,Triggered non-similar slip events on repeating earthquake asperities: Results from 3D numerical simulations based on a friction law,Geophys Res Lett,34,L02308,5,doi:10.1029/2006GL028323。
- Baisch S,Ceranna L,Harjes H P,2008,Earthquake Cluster: What Can We Learn from Waveform Similarity? Bull Seism Soc Amer,9(6),2806~2814。
- Beeler N M,Lockner D L,Hickman S H,2001,A simple stick-slip and creep-slip model for repeating earthquakes and its implication for microearthquakes at Parkfield,Bull Seism Soc Amer,91,1797~1804。
- Bouchon M,Karabulut H,Aktar M,et al,2011,Extended Nucleation of the 1999 M_w 7.6 Izmit Earthquake,Science,331,877~880,doi:10.1126/science.1197341。
- Cassidy J F,Rogers G C,Waldhauser F,2000,Characterization of active faulting beneath the strait of Georgia,British Columbia,Bull Seism Soc Amer,90,1188~1199。
- Chen K H,Bürgmann R,Nadeau R M,et al,2010a,Postseismic variations in seismic moment and recurrence interval of repeating earthquakes,Earth and Planetary Science Letters,299,118~125。
- Chen K H,Bürgmann R,Nadeau R M,2010b,Triggering effect of $M4-5$ earthquakes on the earthquake cycle of repeating events at Parkfield,Bull Seism Soc Amer,100(2),doi:10.1785/0120080369。
- Chen K H,Nadeau R M,Rau R J,2007,Towards a universal rule on the recurrence interval scaling of repeating earthquakes? Geophys Res Lett,34,L16308,5,doi:10.1029/2007GL030554。
- Chen K H,Nadeau R M,Rau R J,2008,Characteristic repeating earthquakes in an arc-continent collision boundary zone: The Chihshang fault of eastern Taiwan,Earth and Planetary Science Letters,276,262~272。
- Chen K H,Rau R J,Hu J C,2009,Variability of repeating earthquake behavior along the Longitudinal Valley fault zone of eastern Taiwan,J Geophys Res,114,B05306,16,doi:10.1029/2007JB005518。
- Cheng X,Niu F,Silver P G,et al,2007,Similar microearthquakes observed in western Nagano,Japan,and implications for rupture mechanics,J Geophys Res,112,B04306,13,doi:10.1029/2006JB004416。
- Danesi S,Bannister S,Morelli A,2007,Repeating earthquakes from rupture of an asperity under an Antarctic outlet glacier,Earth

- and Planetary Science Letters **253**, 151 ~ 158.
- Deichmann N ,García-Fernandez M ,1992 ,Rupture geometry from high-precision relative hypocentre locations of microearthquake ruptures ,*Geophys J Int* **110** ,501 ~ 517.
- Dodge D A ,Beroza G C ,Ellsworth W L ,1995 ,Foreshock sequence of the 1992 Landers , California earthquake and its implications for earthquake nucleation ,*J Geophys Res* **100** ,9865 ~ 9880.
- Dreger D ,Nadeau R M ,Chung A ,2007 ,Repeating earthquake finite source models: Strong asperities revealed on the San Andre as Fault ,*Geophys Res Lett* **34** ,L23302 ,doi: 10.1029/2007GL031353.
- Frémont M J ,Malone S D ,1987 ,High precision relative locations of earthquakes at Mount St. Helens , Washington ,*J Geophys Res* **92** ,10233 ~ 10236.
- Geller R J ,Mueller C S ,1980 ,Four similar earthquake in central California ,*Geophys Res Lett* **10** ,821 ~ 824.
- Got J L ,Frechet J ,Klein F W ,1994 ,Deep fault plane geometry inferred from multiplet relative relocation beneath the south flank of Kilauea ,*J Geophys Res* **99** ,15375 ~ 15386.
- Grêt A ,Snieder R ,2005 ,Monitoring rapid temporal change in a volcano with coda wave interferometry ,*Geophys Res Lett* **32** ,L06304 ,doi: 10.1029/2004GL021143.
- Hough S E ,Field E H ,1996 ,On the coherence of ground motion in the San Fernad Valley ,*Bull Seism Soc Amer* **86** ,1724 ~ 1732.
- Igarashi T ,2010 ,Spatial changes of inter-plate coupling inferred from sequences of small repeating earthquakes in Japan ,*Geophys Res Lett* **37** ,L20304 ,doi: 10.1029/2010GL044609.
- Igarashi T ,Matsuzawa T ,Hasegawa T ,2003 ,Repeating earthquakes and interpolate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone ,*J Geophys Res* **108** ,2249 ,doi: 10.1029/2002JB001920.
- Isacks B L ,Sykes L R ,Oliver J ,1967 ,Spatial and temporal clustering of deep and shallow earthquakes in the Fiji-Tonga-Kermadec region ,*Bull Seism Soc Amer* **57** ,935 ~ 958.
- Ito A ,1985 ,High resolution relative hypocenters of similar earthquakes by cross spectral analysis method ,*J Phys Earth* **33** ,279 ~ 294.
- Johnson L R ,2010 ,An earthquake model with interacting asperities ,*Geophys J Int* ,**182** ,35 ,doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04680.x.
- Kimura H ,Kasahara K ,Igarashi T ,et al 2006 ,Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district , central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips ,*Tectonophysics* **417** ,18 ,doi: 10.1016/j.tecto.2005.06.013.
- Kimura H ,Kasahara K ,Takeda T ,2009 ,Subduction process of the Philippine Sea Plate off the Kanto district , central Japan , as revealed by plate structure and repeating earthquakes ,*Tectonophysics* **472** ,18 ~ 27.
- Lees J M ,1998 ,Multiplet analysis at Coso geothermal ,*Bull Seis Soc Amer* **88** ,1127 ~ 1143.
- 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 ,doi: 10.5194/nhess-11-1969-2011.
- Lin C H ,2004 ,Repeated foreshock sequences in the thrust faulting environment of eastern Taiwan ,*Geophys Res Lett* **31** ,L13601 ,doi: 10.1029/2004GL019833.
- Marone C ,Vidale J E ,Ellsworth W L ,1995 ,Fault healing infeered from time dependent variations in source properties of repeating earthquakes ,*Geophys Res Lett* **22** ,3095 ~ 3098.
- Matsubara M ,Kimura H ,Obara K ,et al 2006 ,Small repeating earthquake activity beneath the Kanto and Tokai region , central Japan ,paper presented at The 6th Joint Meeting of the UJNR Panel on Earthquake Research.
- Matsubara M ,Obara K ,2010 ,High-velocity anomaly accompanied with repeating earthquake beneath the eastern Kanto region ,

- central Japan ,in Japan Geoscience Union Meeting 2010 ,edited p2 ,Makuhari ,Chiba ,Japan.
- Matsubara M ,Yagi Y ,Obara K ,2005 ,Plate boundary slip associated with the 2003 Off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data ,*Geophys Res Lett* **32** ,L08316 ,4 ,doi: 10. 1029/2004GL022310.
- Matsumura S 2010 ,Discrimination of a preparatory stage leading to *M7* characteristic earthquakes off Ibaraki Prefecture ,Japan ,*J Geophys Res* **115** ,B01301 ,14 ,doi: 10. 1029/2009JB006584.
- Matsuzawa T ,Igarashi T ,Hasegawa A ,2002 ,Characteristic small-earthquake sequence of Sanriku ,north Honshu ,Japan ,*Geophys Res Lett* **29** ,1543 ,doi: 10. 1029/2001 GL014632.
- Matsuzawa T ,Uchida N ,Igarashi T ,et al 2004 ,Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu , Japan ,*Earth Planets Space* **56** ,803 ~ 811.
- Menke W ,Lerner-Lam A L ,Dobendorf B ,et al ,1990 ,Polarization and coherence of 5 to 30 Hz seismic wave fields at a hard-rock site and their relevance to velocity heterogeneities in the crust ,*Bull Seism Soc Amer* **80** ,430 ~ 449.
- Moriya H ,Niitsuma H ,Baria R ,2003 ,Multiplet-clustering analysis reveals structural details within the seismic cloud at the Soultz Geothermal Field , France ,*Bull Seism Soc Amer* **93** ,1606 ~ 1620.
- Nadeau R M ,Foxall W ,McEvelly T V ,1995 ,Clustering and periodic recurrence of microseismicities on the San Andreas fault at Parkfield ,California ,*Science* **267** ,503 ~ 507.
- Nadeau R M ,Johnson L R ,1998 ,Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes ,*Bull Seism Soc Amer* **88** ,790 ~ 814.
- Nadeau R M ,McEvelly T V ,1999 ,Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquake ,*Science* **285** ,718 ~ 721 ,doi: 10. 1126/science. 285. 5428. 718.
- Nadeau R M ,Michellini A ,Uhrhammer R A ,et al ,2004 ,Detailed kinematics , structure and recurrence of micro-seismicity in the SAFOD target region ,*Geophys Res Lett* **31** ,L12S08 ,4 ,doi: 10. 1029/2003GL019409.
- Nakahara H ,2004 ,Correlation distance of waveforms for closely located events-I. Implication of the heterogeneous structure around the source region of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu ,Japan , earthquake ($M_w = 6. 9$) ,*Geophys J Int* **157** ,14 ,doi: 10. 1111/j. 1365-246X. 2004. 02278. x.
- Nakamura A ,Hasegawa A ,Hirata N ,et al ,2002 ,Temporal variations of seismic wave velocity associated with 1998 *M6. 1* Shizuikuishi earthquake ,*Pure Appl Geophys* **159** ,1183 ~ 1204.
- Niu F ,Silver P G ,Nadeau R M ,et al ,2003 ,Migration of seismic scatterers associated with the 1993 Parkfield aseismic transient event ,*Nature* **426** ,544 ~ 548.
- 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 ,doi: 10. 1029/2005GL025355.
- Peng Z ,Ben-Zion Y ,2005 ,Spatiotemporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 *M7. 4* Izmit and *M7. 1* Düzce ,Turkey ,earthquake sequences ,*Geophys J Int* **160** ,17 ,doi: 10. 1111/j. 1365-246X. 2005. 02569. x.
- Peng Z ,Vidale J E ,Houston H ,2006 ,Anomalous early aftershock decay rate of the 2004 $M_w 6. 0$ Parkfield ,California ,earthquake ,*Geophys Res Lett* **33** ,L17307 ,doi: 10. 1029/2006GL026744.
- Peng Z ,Vidale J E ,Ishii M ,et al ,2007 ,Seismicity rate immediately before and after main shock rupture from high-frequency waveforms in Japan ,*J Geophys Res* **112** ,B03306 ,16 ,doi: 10. 1029/2006JB004386.
- Peng Z ,Zhao P ,2009 ,Using new technique ,scientists find eleven times more aftershocks for 2004 quake ,*Nature Geoscience* **2** ,877 ~ 881.
- Phillips W S ,2000 ,Precise microearthquake locations and fluid flow in the geothermal reservoir at Soultz-sous-Forêts ,France ,*Bull Seism Soc Amer* **90** ,212 ~ 228.
- Poupinet G ,Ellsworth W L ,Fréchet J ,1984 ,Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras fault , California ,*J Geophys Res* **89** ,5719 ~ 5731.
- Rau R J ,Chen K H ,Ching K E ,2007 ,Repeating earthquakes and seismic potential along the northern Longitudinal Valley fault of eastern Taiwan ,*Geophys Res Lett* **34** ,L24301 ,6 ,doi: 10. 1029/2007GL031622.
- Richards P G ,Waldhauser F ,Schaff D ,et al ,2006 ,The applicability of modern methods of earthquake location ,*Pure Appl*

- Geophys **163** 351 ~ 372.
- Roberts P M ,1991 ,Development of active doublet method for monitoring small changes in crustal properties ,Seismol Res Lett **62** (1) 36 ~ 37.
- Roberts P M ,Phillips W S ,Fehler M C ,1992 ,Development of active doublet method for measuring small velocity and attenuation changes in solids ,J Acoust Soc Am **91** (6) 3291 ~ 3302.
- Rubin A M 2002 ,Using repeating earthquakes to correct high-precision earthquake catalogs for time-dependent station delays ,Bull Seism Soc Amer **92** ,1647 ~ 1659.
- Rubin A M ,Gillard D ,Got J L ,1999 ,Streaks of microearthquakes along creeping faults ,Nature **400** 635 ~ 641.
- Rubinstein J L ,Ellsworth W L 2010 ,Precise estimation of repeating earthquake moment: Example from Parkfield , California ,Bull Seism Soc Amer **100** ,1952 ~ 1961 ,doi: 10. 1785/0120100007.
- Sammis C G ,Rice J R ,2001 ,Repeating earthquakes as low-stress-drop events at a border between locked and creeping fault patches ,Bull Seism Soc Amer **91** 532 ~ 537.
- Schaff D P 2010 ,Improvements to detection capability by cross-correlating for similar events: a case study of the 1999 Xiuyan , China ,sequence and synthetic sensitivity tests ,Geophys J Int **180** 829 ~ 846.
- Schaff D P ,Beroza G C 2004 ,Coseismic and postseismic velocity changes measured by repeating earthquakes ,J Geophys Res **109** , B10302 ,doi: 10. 1029/2004JB003011.
- Schaff D P ,Beroza G C ,Shaw B E ,1998 ,Postseismic response of repeating aftershocks ,Geophys Res Lett **25** 4549 ~ 4552.
- Schaff D P ,Bokelmann G H R ,Beroza G C ,et al 2002 ,High resolution image of Calaveras Fault seismicity ,J Geophys Res **107** (B9) 2186 ,doi: 10. 1029/2001JB000633.
- 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 Amer **94** 867 ~ 879.
- Schaff D P ,Waldhauser F 2005 ,Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the Northern California Seismic Network ,Bull Seism Soc Amer **95** 2446 ~ 2461.
- Schmidt D A ,Bürgmann R ,Nadeau R M ,et al 2005 ,Distribution of aseismic slip rate on the Hayward fault inferred from seismic and geodetic data ,J Geophys Res **110** ,B08406 ,15 ,doi: 10. 1029/2004JB003397.
- Shearer P M ,1997 ,Improving local earthquake locations using the L1 norm and waveform cross correlation: application to the Whittier Narrows ,California ,aftershock sequence ,J Geophys Res **102** 8269 ~ 8283.
- Shearer P M ,1998 ,Evidence from a cluster of small earthquakes for a fault at 18km depth beneath Oak Ridge , southern California , Bull Seism Soc Amer **88** ,1327 ~ 1336.
- Snieder R ,Hagerty M , 2004 ,Monitoring change in volcanic interiors using coda wave interferometry: application to Arenal Volcano ,Costa Rica ,Geophys Res Lett **31** ,L09608 ,doi: 10. 1029/2004GL019670.
- Song X D ,Richards P G ,1996 ,Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core ,Nature **382** 221 ~ 224.
- 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 Amer **98** (1) ,14 ,doi: 10. 1785/0120070026.
- Uchida N ,Igarashi T ,Matsuzawa T ,et al 2003a ,Interplate quasi-static slip estimated from repeating earthquake analyses in the northeastern Japan subduction zone (extended abstract) ,Tôhoku Geophys Journ **36** 531 ~ 534.
- Uchida N ,Matsuzawa T ,Ellsworth W L ,et al ,2007 ,Source parameters of a $M4. 8$ and its accompanying repeating earthquakes off Kamaishi ,NE Japan: Implications for the hierarchical structure of asperities and earthquake cycle ,Geophys Res Lett **34** , L20313 ,doi: 10. 1029/2007GL031263.
- Uchida N ,Matsuzawa T ,Hasegawa A , et al 2003b ,Interplate quasi-static slip off Sanriku ,NE Japan ,estimated from repeating earthquakes ,Geophys Res Lett **30** (15) 4 ,doi: 10. 1029/2003GL017452.
- Uchida N ,Matsuzawa T ,Hasegawa A ,et al 2005 ,Recurrence intervals of characteristic $M4. 8 \pm 0. 1$ earthquakes off-Kamaishi ,NE Japan- Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data ,Earth and Planetary Science Letters **233** ,155 ~ 165.
- Uchida N ,Matsuzawa T ,Hirahara S 2006 ,Small repeating earthquakes and interplate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake

- ($M = 7.2$), *Earth Planets Space* **58**, 1577 ~ 1580.
- Uchida N, Matsuzawa T, Nakajima J, et al 2010, Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes, *J Geophys Res*, **115**, B07309, **14**, doi: 10.1029/2009JB006962.
- Vidale J E, Cochran E S, Kanamori H, et al 2003, After the lightning and before the thunder: Ixion-Omori behavior of early aftershocks? *EOS Trans AGU* **84**, Fall meeting suppl, Abstract S3 1A-08.
- 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.
- Wu C, Koketsu K, Miyake H 2008, Source processes of the 1978 and 2005 Miyagi-oki, Japan, earthquakes: Repeated rupture of asperities over successive large earthquakes, *J Geophys Res*, **113**, B08316, **15**, doi: 10.1029/2007JB005189.
- Yamawaki T, Nishimura T, Hamaguchi H 2004, Temporal change of seismic structure around Iwate volcano inferred from waveform correlation analysis of similar earthquakes, *Geophys Res Lett* **31**, L24616, **4**, doi: 10.1029/2004GL021103.
- Yang H, Zhu L, Chu R 2009, Fault-plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, earthquake by detecting and relocating aftershocks, *Bull Seism Soc Amer* **99**, 3413 ~ 3420.
- Zhang J, Richards P G, Schaff D P 2008, Wide-scale detection of earthquake waveform doublets and further evidence for inner core super-rotation, *Geophys J Int* **174**, **14**, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03856.x.
- Zhang J, Song X D, Li Y C, et al 2005, Inner core differential motion confirmed by earthquake waveform doublets, *Science* **309**, 1357 ~ 1360.
- Zhao P, Peng Z 2008, Velocity contrast along the Calaveras fault from analysis of fault zone head waves generated by repeating earthquakes, *Geophys Res Lett* **35**, L01303, doi: 10.1029/2007GL031810.

Review of ‘Repeating earthquakes’ by cross-correlation of seismic waveforms

Li Yutong^{1,2)} Jiang Changsheng²⁾

1) Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110034, China

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

Abstract ‘Repeating earthquakes’, identified by cross-correlation of seismic waveforms, are found to be much more abundant in nature than conventionally expected. In recent years, with the development of digital seismic networks, waveform correlation and ‘repeating earthquake’ have drawn much attention in measuring crustal media variation, assessing the location accuracy at the network and estimating fault slip rates at depth or earthquake recurrence. Moreover, as a useful tool, ‘repeating earthquake’ approach has also been used in the study of the assessment of phase picking accuracy, hypocenter location, the temporal variation of structures, physics of earthquake source as well as earthquake prediction. In this paper, we summarize the latest research about the application of ‘repeating earthquakes’.

Key words: Repeating earthquakes Waveform cross-correlation Variation of crustal media Estimating the location accuracy Fault slip rates at depth