

唐兰兰, 孔祥艳, 龙锋, 冯建刚. 2013. 柯坪塔格断裂带重复地震识别及其时空特征分析. 地震学报, 35(3): 328-340.
Tang Lanlan, Kong Xiangyan, Long Feng, Feng Jiangang. 2013. Identification and spatio-temporal characteristics of repeating earthquakes in Kepingtage fault zone. *Acta Seismologica Sinica*, 35(3): 328-340.

柯坪塔格断裂带重复地震识别 及其时空特征分析^{*}

唐兰兰^{1,*} 孔祥艳¹ 龙 锋² 冯建刚³

1) 中国乌鲁木齐 830011 新疆维吾尔自治区地震局

2) 中国成都 610041 四川省地震局

3) 中国兰州 730000 中国地震局兰州地震研究所

摘要 根据互相关系数不小于 0.8 的波形互相关意义上重复地震的定义, 利用国家数字地震台网中的乌什和巴楚台记录的区域地震波形数据, 识别并研究了新疆柯坪塔格断裂带及其周缘的板内重复地震。对所有相互距离不超过 30 km 的地震事件的垂直分量采用 0.5—5.0 Hz 带通滤波后进行波形互相关计算。其中乌什台共识别出 460 例重复地震, 组成重复地震对和多重地震对共 171 组, 占总事件数的 15.5%; 巴楚台共识别出 822 例重复地震, 组成重复地震对和多重地震对共 298 组, 占总事件数的 21.2%。对重复地震的分析表明, 台站分布的不同和波形事件记录质量的差异, 是造成两个台站识别出的“重复地震”数目和比例不同的原因。对重复地震复发的时间间隔统计表明, 重复间隔从数分钟到数百天不等, 最长重复间隔达 10 年。

关键词 重复地震 波形互相关 柯坪塔格推覆构造

doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2013.03.005 中图分类号: P315.2 文献标志码: A

Identification and spatio-temporal characteristics of repeating earthquakes in Kepingtage fault zone

Tang Lanlan^{1,*} Kong Xiangyan¹ Long Feng² Feng Jiangang³

1) Earthquake Administration of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830011, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3) Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Lanzhou 730000, China

Abstract: According to the definition of repeating earthquakes that the waveform cross-correlation coefficient is not less than 0.8, intraplate repeating earthquakes in and around Kepingtage fault zone, XinJiang, were identified and studied using waveform data recorded at WUS and BCH national digital seismic stations. Waveform cross-correlation analysis was carried out after 0.5—5.0 Hz

* 基金项目 国家科技支撑课题(2012BAK19B01)、中国地震局地震预测研究所 2011 年度重点项目课题“南北地震带中部潜在强震危险区的监测和研究”(2011IES010104)和 2011 年度震情跟踪合同制定向工作任务(2011020112)联合资助。

收稿日期 2012-02-24 收到初稿, 2012-06-28 决定采用修改稿。

^{*} 通讯作者 e-mail: tllfeg1981@163.com

bandpass-filtering on vertical components records from the events being less than 30 km away from each other. Altogether 460 repeating earthquakes were identified from WUS station, which comprised 171 doublets and multiplets, making up 15.5% of total events; 822 repeating earthquakes were identified from BCH station, which comprised 298 doublets and multiplets, making up 21.2% of total events. Our analysis of the repeating earthquakes show that the difference in the number and proportion of repeating earthquakes between the two stations is attributed to the difference in the distribution of stations and waveform record quality. Statistics show that the time interval between repeating earthquakes ranges from a few minutes to hundreds of days, the longest being 10 years.

Key words: repeating earthquakes; waveform cross-correlation; Kepingtage nappe structure

引言

围绕重复地震的讨论近年来逐渐成为地震学研究中的热点问题。一般认为,发生在同一个断层位置上,震级相近、地震波形和震源机制相似的天然地震被称为重复地震(Poupinet *et al*, 1984; Nadeau, *et al*, 1995)。Nadeau 和 Johnson(1998)在发现板间重复地震后提出了重复地震的发生机理,认为重复地震是稳滑区域(大的蠕变区)包围强的凹凸体的重复破裂。Evans 等(2005)和 Baisch 等(2006)发现,当高压流体侵入岩石时也可以引发重复地震。流体侵入到已有的岩石裂隙后使有效正应力减小,当剪应力与正应力之比超过摩擦强度时就会导致剪切滑动引发重复地震。Schaff 和 Richards (2004)将一对地震事件被至少一个台站记录到的波形之间的相关系数不小于 0.8 的地震对称为重复地震。除了重复地震外,一些余震的波形也具有较高的相似性。Rubin 和 Gillard(2000)给出了更加严格的重复地震的定义,即重复地震的破裂面积是相互重叠的,并认为这可能是与波形上重复的余震的区别。

近年来在位于板块边缘的多个断裂带上都发现了重复地震。例如,位于板块边界的美国圣安德烈斯断裂带的 Parkfield 地区(Ellsworth, Dietz, 1990; Vidale *et al*, 1994; Nadeau *et al*, 1995; Nadeau, Johnson, 1998; Rubin, 2002; Templeton *et al*, 2008),日本东北俯冲带(Matsuzawa *et al*, 2004; Igarashi *et al*, 2003; Uchida *et al*, 2007, 2010),以及中国台湾东部地区的池上断裂带和花莲(Chen *et al*, 2007, 2009; Rau *et al*, 2007)等地区,并发现重复地震的发生与断层的活动有很大关系。与板缘地震相比,对于板内地震复发行为的研究起步较晚, Schaff 和 Richards(2004)通过对远震波形资料的分析,指出中国及邻区波形相关意义上的“重复地震”约占地震总数的 10%甚至更多。而最新研究结果显示(Schaff, Richards, 2011),中国及邻区波形相关意义上的“重复地震”约占地震总数的 13%。由于大地震的断层破裂尺度较大,再次发生原地重复破裂的可能性低,因此重复地震的震级较小,一般 $M_s < 3.0$ 。但也有研究人员在 Fiji-Tonga 地区, South Sandwich Islands, 以及 Miyagi-oki 等地区发现了 $M_s \geq 5.0$ 的重复地震(Isacks *et al*, 1967; Li, Richards, 2003; Wu *et al*, 2008)。

重复地震从其激发方式,可以分为人工“重复地震”和天然“重复地震”。目前重复地震

得到了广泛的应用。利用重复地震进行的研究主要可分为两类：一类是对重复地震本身性质的研究，如估算断层滑动速率，研究复发模式等。断层滑动速率是构造活动研究中十分重要的参量，基于“重复地震”来估算孕震深处的滑动速率目前已成为可能（李乐等，2008；Li *et al*., 2011）。由于强震往往具有原地复发的现象，国内外许多学者对强震的复发模式及特征进行了研究，以期预测未来发生的强震（Wallance 1970；Savage, Cockerham, 1987；马瑾，许秀琴，1989；程海旭，吴开统，1996；闻学泽，1999；冉勇康，邓起东，1999）。重复地震另一主要的研究则是对重复地震激发出的信号的利用，如检测介质中的波速变化、台网定位精度评估等。利用人工可控震源“重复地震”和天然重复地震多次散射波记录中的相位信息来检测地下介质性质随时间的变化，能极大提高波速随时间变化的检测精度（Nakamura *et al*., 2002；Niu *et al*., 2003；Snieder, Hagerty, 2004；Grêt, Snieder, 2005；Pandolfi *et al*., 2006；Poupinet *et al*., 1984；周龙泉等，2007）。

Roberts (1991) 在实验室中利用人工重复地震法，精确测定试验介质中的波速与衰减特性随温度的变化。Zhang 等(2005)利用穿过地核的重复地震波的走时变化，证实了地球内核与外核之间的旋转速度具有差异性。林建民等(2006)通过野外试验对人工重复地震的潜在应用进行了分析。重复地震作为无成本的天然“标定事件”，使用波形互相关技术和“重复地震”评估地震台网定位精度的技术引起人们越来越多的关注(Schaff, Waldhauser, 2005；蒋长胜等，2005, 2008；李宇彤等，2008)。此外，天然“重复地震”也广泛应用于断层结构和震源物理研究中(Vidale *et al*., 1994；Nadeau, McEvilly, 1997；Nadeau, Johnson, 1998；Lin, 2004)。

在重复地震的研究中，很重要的是对板内重复地震基本特征的研究。尽管 Schaff 和 Richards (2004)已开展对中国大陆板内重复地震基本分布的研究，但由于其主要使用了远震记录，微震事件较少，因此，使用区域地震记录和更多的微震事件对认识区域构造内重复地震的基本分布规律就尤为重要。本研究中，将选用地震发生率较高的新疆柯坪塔格断裂带，利用区域地震记录开展重复地震的识别和基本特征研究。

1 柯坪塔格构造及地震活动背景

柯坪塔格逆冲推覆构造是新生代以来印度与欧亚两大板块碰撞，天山晚古生代断裂褶皱系重新复活隆起并向 NS 两侧推挤，在前陆盆地中形成的推覆体(Tapponnier, Molnar, 1997；Burchfiel *et al*., 1999；Burbank *et al*., 1999；邓起东等，2000；Bullen *et al*., 2003)。它位于塔里木盆地西北缘，是西南天山前陆构造的一部分。其向西和西南与阿图什—八盘水磨反冲构造相对接，东至阿克苏，与库车逆冲构造系逐渐过渡，整体形成了以近 NS 向的普昌(或称皮羌)断裂为界的向南凸出的弧形推覆构造(贾承造，1997；曲国胜等，2003；邓起东等，2000)。整个柯坪塔格推覆系统有向西倾伏，向东抬升的特点，弧形推覆系统整体由北向南逆冲推覆(曲国胜等，2003)。柯坪推覆构造 EW 长 300 km, NS 宽 65—75 km, 横向上由 5—6 排近乎平行的 ENE 向褶皱带及其之间的新生代盆地或谷地构成。普昌断裂将柯坪推覆构造分割成东、西两部分。在纵向上，普昌断裂以西，由自北向南逆冲的柯坪塔格、奥兹格尔他乌、托克散阿塔能拜勒—皮羌山、科克布克三山及奥依布拉克等 5 排推覆体组成；普昌断裂以东，由自北向南逆冲的柯坪塔格、塔塔埃尔塔格、衣木干它乌、阿布拉衣布拉克—皮羌山、科克布克三山及奥依布拉克等 6 排推覆体组成(闵伟等，2006)。

西南天山的新构造变形和地震活动都非常强烈。1902年阿图什 $M_s 8.2$ 地震发生于柯坪塔格推覆构造西侧的阿图什—八盘水磨反冲构造带, 是该区发生过的最大地震。柯坪塔格断裂是一条与强震密切相关的断裂, 沿柯坪塔格推覆构造的最前缘的柯坪塔格断裂历史上曾发生过一系列 $M_s 6.0—6.9$ 强震, 如 1953 年三岔口 $M_s 6.0$ 地震、1961 年巴楚 $M_s 6.0$ 强震群、1972 年巴楚 $M_s 6.2$ 地震、1977 年西克尔 $M_s 6.2$ 地震及 1991 年柯坪 $M_s 6.5$ 地震(图 1)。该断裂现代中小地震也非常活跃, 1970 年以来 $M_s 3.0—3.9$ 地震平均年频次 78 次, $M_s 4.0—4.9$ 地震 15 次, $M_s 5.0—5.9$ 地震 2 次。

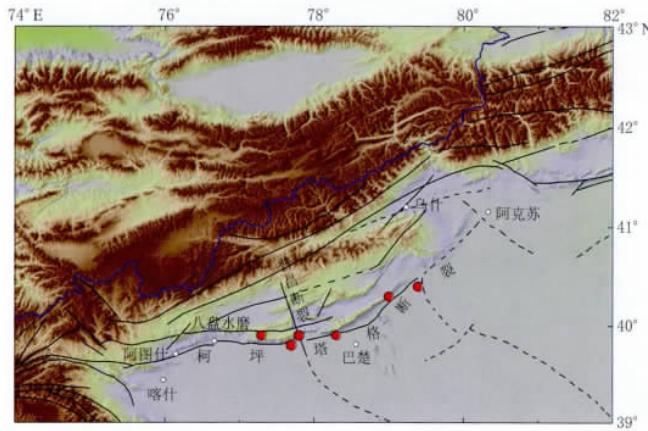


图 1 柯坪块体构造和柯坪塔格断裂 1953 年以来 $M_s \geq 6.0$ 强震震中分布图

红色实心圆表示 $M_s \geq 6.0$ 地震, 黑色实线为活动构造, 黑色虚线为推测的活动构造

Fig. 1 Tectonic setting and distribution of $M_s \geq 6.0$ earthquakes since 1953 in Keping region
Solid red circles mark $M_s \geq 6.0$ earthquakes, solid black lines represent active tectonics
and dashed black lines represent inferred active tectonics

2 资料和方法

为了加强新疆地区的地震监测能力, 中国地震局于 2006 年完成了新疆地震台网的宽频带数字化改造。“十五”网络项目完成后, 新疆数字地震台网建成 1 个测震台网部, 新建、改建并升级国家和区域测震台站 60 个。其中, 国家台 15 个, 均安装宽(甚宽)频带地震计; 区域台 45 个, 安装宽频带地震计 42 个, 安装井下短周期地震计 3 个。建成由短周期流动测震子台 12 个及流动数字测震台网中心组成的流动数字测震台网 1 个。随着地震观测系统建设的完成和系统的运转, 目前新疆数字地震台网累积了大量地震波形数据, 为柯坪块体重复地震识别提供了数据保障和新的契机。本文尝试利用国家数字地震台网中心乌什和巴楚台的震相观测报告和波形资料直接识别重复地震, 同时分析重复地震的时空分布特征。

柯坪块体虽然中小地震频发, 但是区内台站分布却较为稀疏。由图 2 可见, 区内共有 7 个数字地震台, 台站间距均超过 60 km。其中八盘水磨(BPM)、西克尔(XKR)、神木园(SMY)3 个台是 2005 年 12 月—2007 年 4 月陆续新建的数字地震台, 阿合奇(AHQ)和阿克苏(AKS)两个台站在 2005 年 12 月之前是模拟记录, 2006 年之后进行数字化改造。因此考虑到数字资料时间跨度, 本研究选用 2000 年之后就开始有数字记录的巴楚(BCH)和乌

什(WUS)国家数字地震台,选取2001年1月—2011年2月发生在柯坪块体(39° — 42° N, 76° — 81° E)的 $M_s \geq 1.0$ 天然地震事件作为研究对象。此时段内,新疆数字地震台网共记录了柯坪塔格断裂带内及周缘的地震4523次,其震级范围为 $M_s 1.0$ —5.8,如图2所示。鉴于两个台站资料存储完备情况的差异,巴楚台选取了2001年1月—2010年12月的地震波形资料,而乌什台选取了2002年10月—2011年2月的地震波形资料。研究区所选地震与两个台站的距离最远均不超过300 km。

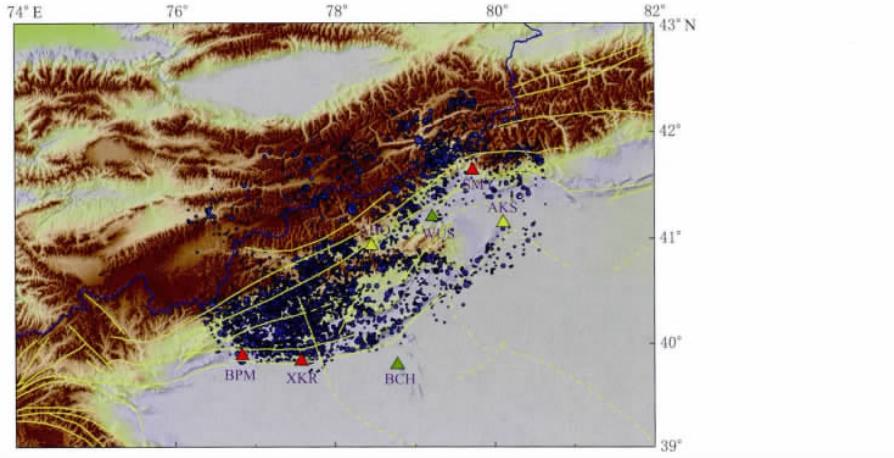


图2 柯坪块体地震台站和2001—2011年2月以来地震分布
 蓝色实心圆表示 $M_s \geq 1.0$ 地震, 红色三角形表示 2005 年之后新建数字化台站,
 黄色三角形表示 2006 年之后进行数字化改造的台站, 绿色三角形表示
 2000 年之后开始有数字记录的台站

Fig. 2 Distribution of seismic stations and earthquakes from 2001 to Feb. 2011, in Keping region
 Solid blue circles mark $M_s \geq 1.0$ earthquakes, red triangles represent digital stations built
 after 2005, yellow triangles represent stations after digital reconstruction in 2006 and
 green triangles denote the stations which began digital recording in 2000

波形互相关技术用于识别天然重复地震已有较长历史。Luo 和 Schuster(1991)首先利用观测波形与理论波形之间的互相关进行地震波走时测量; Marquering 等(1999)利用两个观测波形之间的互相关来测量走时差。尽管重复地震具有不同的定义,但不同定义的基本特点就是波形具有高度相似性。因此,通过对两次地震的观测波形进行互相关计算可用于识别重复地震。本文对“重复地震”的识别包含了对波形垂直分量 P 波、S 波在内的部分波列的计算。计算选用波形的窗长为相应地震震相报告中 Pg 震相到时前 3 s 至 Sg 震相后 Sg 与 Pg 震相走时差的 1.2 倍。波形互相关系数采用以下公式计算(Bath, 1974):

$$\gamma = \frac{\sum [f_1(t) - \bar{f}_1(t)][f_2(t) - \bar{f}_2(t)]}{\sqrt{\sum [f_1(t) - \bar{f}_1(t)]^2 \sum [f_2(t) - \bar{f}_2(t)]^2}} \quad (1)$$

式中, $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 分别为计算窗内同一台站记录到的两事件波列。 $f_1(t)$ 的起始位置固定在其 Pg 到时前 3 s 处, $f_2(t)$ 初始位置自其 Pg 到时前 4 s 至到时处逐点滑动。 $\bar{f}_1(t)$ 和 $\bar{f}_2(t)$ 分别是相应的平均值。计算中取 γ 最大值为最终结果。

考虑到仪器记录平坦频带范围及环境噪声的影响, 波形相关分析前对波形统一进行了

带通滤波。为了选择合适的滤波频段,分别尝试选用0.5—5,1—5和1—10 Hz的带通滤波范围对一丛地震进行滤波实验,而后再进行波形互相关分析。试验结果表明,0.5—5和1—5 Hz范围的带通滤波,相同两次地震的波形互相关系数较为一致,且重复地震识别率差别不大。0.5—5 Hz的滤波范围识别率相对较高,而提高滤波上限,即当达到1—10 Hz的滤波范围时,高频噪声部分的加入大大降低了重复地震的识别率。故最终选定0.5—5 Hz频带范围进行滤波,且两个台站地震计的地动速度频率响应曲线在该滤波频段皆属于平坦段。图3为2005年和2007年发生的一组重复地震对采用不同滤波范围滤波后的波形互相关计算结果。从图3可以看出,1—10 Hz的滤波得到的互相关系数最低,0.5—5 Hz滤波得到的互相关系数略高于1—5 Hz滤波。巴楚台和乌什台分别在2007年和2008年更

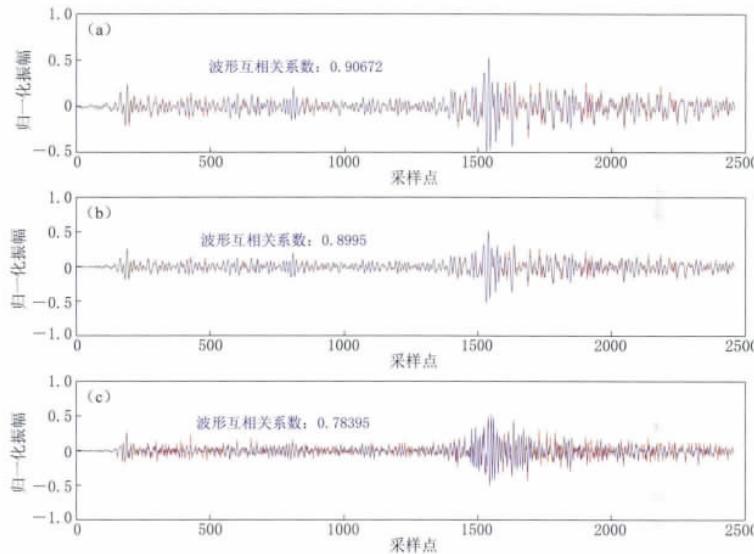


图3 采用不同频率范围带通滤波计算波形互相关系数的示例

蓝色和红色分别表示2005年3月1日 $M_{S2.1}$ 地震和2007年9月23日 $M_{S2.8}$ 地震的波形记录

(a) 滤波范围 0.5—5 Hz; (b) 滤波范围 1—5 Hz; (c) 滤波范围 1—10 Hz

Fig. 3 An example of waveform cross-correlation coefficient computation using bandpass filtering with different frequency ranges

Blue and red lines represent waveform records of the $M_{S2.1}$ earthquake on March 1, 2005, and the $M_{S2.8}$ earthquake on Sep. 23, 2007, respectively

(a) 0.5—5 Hz; (b) 1—5 Hz; (c) 1—10 Hz

换数采,将采样率由原来的50 Hz提高到100 Hz。其中巴楚台在2007年3月由FBS-3型地震计更换为CTS-1型地震计,为了使更换仪器前后记录的所有波形数据都可参与波形互相关运算,进行了去仪器响应和重采样实验。结果显示,是否扣除仪器响应对于波形互相关计算结果影响非常微弱。通过滤波和重采样实验发现,滤波和重采样的先后顺序对于波形互相关系数也有较大影响,先滤波再重采样对于信噪比较低的波形也能得到较高的波形互相关系数。究其原因主要是由于先进行重采样会加重高频噪声,故最终在波形预处理时未扣除仪器响应,采用了先带通滤波继而重采样的预处理方式。

通过整理新疆乌什台、巴楚台的震相观测报告及数字波形资料,确定乌什台有2974次地震的波形资料可用,巴楚台有3874次地震波形资料可用,地震及台站分布情况如图2

所示. 每条波形记录做波形互相关前均进行了 0.5—5 Hz 带通滤波, 并利用其最大振幅进行了归一化处理. 在选取可能的重复地震组对时, 考虑到区域台网定位水平, 每次地震与相距 30 km 范围内的地震进行互相关运算. 图 4 给出了巴楚台记录到的一组由 4 次地震构成的多重地震对.

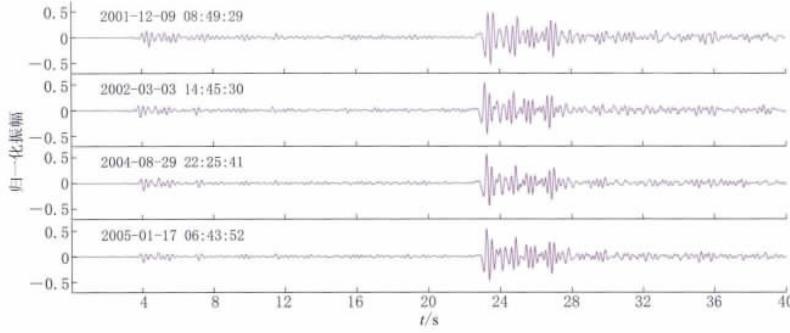


图 4 巴楚地震台记录的重复地震组示例

图中地震波形左上方给出了地震发震时刻

Fig. 4 An example of repeating earthquakes recorded at BCH station

Origin time of each earthquake is marked on the upper left of each trace

3 柯坪块体“重复地震”分布特征

经过波形互相关分析, 巴楚台记录波形中, 相关系数 ≥ 0.8 的共有 822 次地震, 共组成 298 组重复地震, 其中包括 202 组由 2 次地震构成的重复地震对(doublet)和 95 组由 2 次以上地震构成的多重地震对(multiplet). 重复地震占可用地震总数的 21.2%, 震级范围 $M_S 1.0—4.5$ (图 5a). 乌什台记录波形的相关系数 ≥ 0.8 地震有 460 次, 共组成 171 组重复地震. 其中包括 114 组由 2 次地震构成的重复地震对和 56 组由 2 次以上地震构成的多重地震对, 重复地震占可用地震总数的 15.5%, 震级范围 $M_S 1.0—4.3$ (图 5b)考虑到两个台站选取的研究时段不同, 可能会导致统计结果存在差异, 因此选取两个台站均有数据的 2002 年 10 月—2010 年 12 月作为共同时段, 将此时段内发生的重复地震重新进行统计. 结果显示, 在该时段内巴楚台共识别出 714 例重复地震, 重复地震占该时段内可用地震总数的 21.4%; 乌什台共识别出 448 例重复地震, 重复地震占该时段内可用地震总数的 15.4%. 上述统计结果表明, 即使选用了共同时段, 统计得到的重复地震比例与非共同时段得到的结果仍然非常接近, 也就是说两个台站的重复地震识别结果依然存在较大差异, 这种差异可能与选取的台站有关.

由上述结果可知, 随着所用台站的不同, 得到的“重复地震”的结果亦不尽相同. 就重复地震的重复特性而言, 要求其位置、震源机制解都具有极高的重复性, 因此对于一组真实的重复地震, 其辐射图型是相同的, 到达某一台站的传播路径也是相同的, 识别结果的差异不会由于其辐射图型和传播路径的不同而不同. 其原因可能是由于特定的辐射图型在不同的台站上会产生不同的波形, 因此在有些台站上记录的信号的信噪比较高, 有些则较低. 本研究所选用的乌什台较巴楚台距离块体西侧地震更远, 导致波形记录质量也较差, 因而在做互相关计算时, 信噪比较低的信号受到噪声的干扰, 使得相关系数不能完全表征

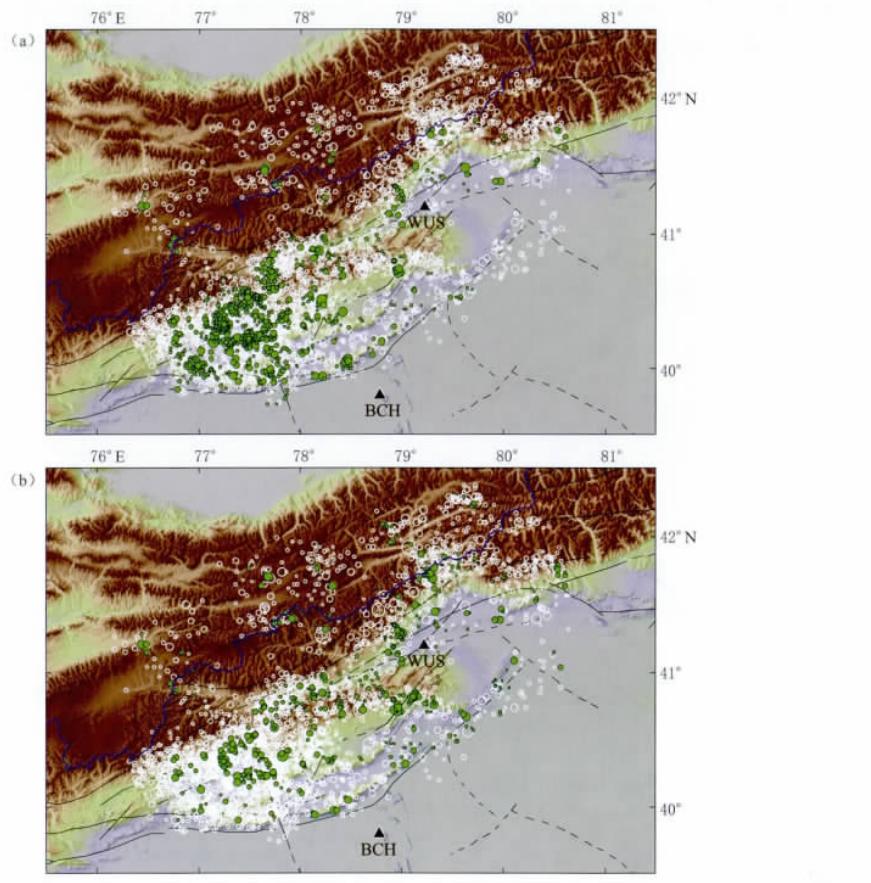


图 5 巴楚台(a)和乌什台(b)识别出的重复地震和全部地震的震中分布
绿色实心圆为重复地震,白色空心圆为全部地震,黑色三角形为选用的台站

Fig. 5 Epicenters distribution of repeating earthquakes identified by BCH (a) and WUS (b) stations and all of this other earthquakes used in the study
Solid green circles mark the repeating earthquakes, white circles mark all of the other earthquakes, and black triangles stand for the stations used

震源的重复性。综合上述分析认为,两个台站得到的重复地震识别结果的差异,可能与台站分布以及波形记录质量的差异有关。

如图 6 所示,将上述两个台站的重复地震识别结果取并集后得到 1055 例重复地震,聚类后形成 357 丛重复地震组,重复地震占可用地震总数(4433)的 23.8%。由图 6 可见,研究区内重复地震大多沿着区内的几条主要推覆体分布,普昌断裂西侧重复地震形成一环状丛集分布区。从图 1 中可以看出,该区域属于普昌断裂及块体西侧两条平行的推覆体围绕形成的山间盆地,1900 年以来环状丛集分布区内曾发生过多次 $M_s 5.0$ — 5.9 地震,但是从未发生过 $M_s 6.0$ 以上强震。而在 $M_s 6.0$ 以上强震最为活跃的柯坪塔格推覆构造最前缘的柯坪塔格断裂带上,重复地震分布却相对较少,其原因可能在于经历数次强震后断层已完全愈合,断裂带上缺乏已破坏的薄弱地带。普昌断裂东侧的重复地震在阔克萨勒断裂延伸进天山的支脉上较为集中,同时在 2005 年 2 月 15 日乌什 $M_s 6.3$ 地震的余震区也形成一

一个显著的集中区。柯坪块体普昌断裂东西两侧地震活动水平存在显著差异，西侧小震活动频次及地震活动强度都明显高于东侧。研究时段内约 44% 地震发生在柯坪块体西侧，即普昌断裂以西至八盘水磨的区域，而该区域面积约为柯坪块体东侧面积的 1/3。分别统计了两侧的重复地震发生率，结果显示西侧重复地震发生率(27.9%)也明显高于东侧(19.8%)。

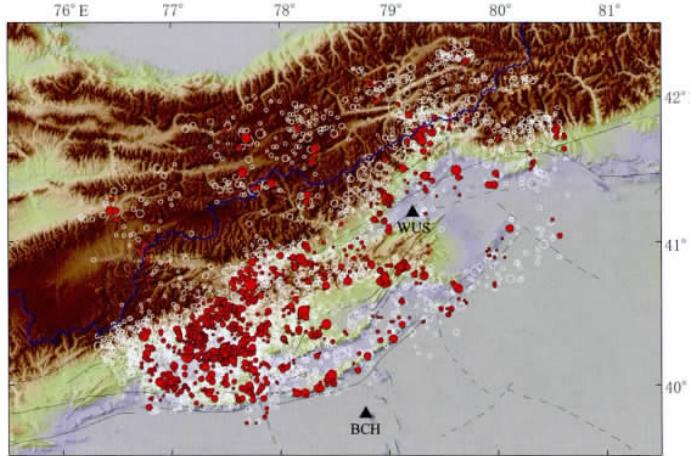


图 6 巴楚台和乌什台联合聚类得到的重复地震分布

白色空心圆为研究选用的地震，红色实心圆为识别出的重复地震，黑色三角形为选用的台站

Fig. 6 Distribution of repeating earthquakes identified by correlation clustering of BCH and WUS stations

White circles mark the earthquakes used in the study, solid red circles denote repeating earthquakes, and black triangles stand for the stations used

对重复地震震级分布的统计显示(图 7)，大部分重复地震震级都在 $M_S 3.0$ 以下，约占总数的 97%。识别出的重复地震中，由 2 次地震构成的重复地震对有 228 组，约占总重复地震数的 43%(图 8)，最多的 1 组多重地震对由 18 次地震构成。此外，对重复地震时间间隔的统计显示，在每组重复地震中，重复周期有着明显的变化，相邻重复地震的时间间隔跨度从数分钟到数百天不等，最长重复间隔达 10 年。而 228 组由两次重复地震组成的重复地震对中，有 85 组是在 24 小时之内发生。

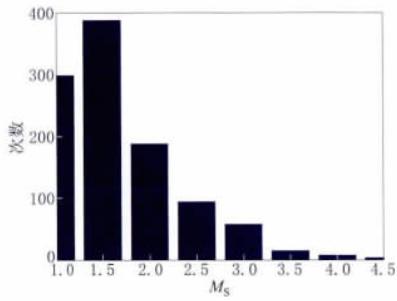


图 7 不同震级重复地震数量统计图

Fig. 7 Statistics of the number of repeating earthquakes in different magnitudes

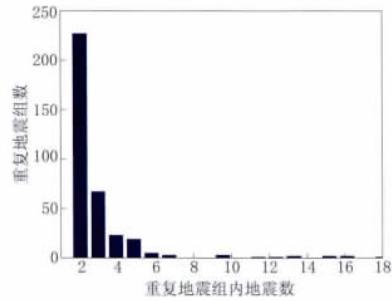


图 8 重复地震组内地震次数统计图

Fig. 8 Statistics of the number of earthquakes in different doublets

2001—2010年柯坪块体内重复地震和全部地震 $M_s 1.0$ 以上地震年频次统计结果显示(图9), 2001—2004年全部地震和重复地震年频次均呈现上升趋势, 在此时间段内全部地震和重复地震年频次均低于2006年之后的地震年频次, 这可能与新疆测震台网于2005年12月之后在柯坪块体内新建3个数字地震台、改建2个模拟台后提高了该区域的地震监测能力有关。

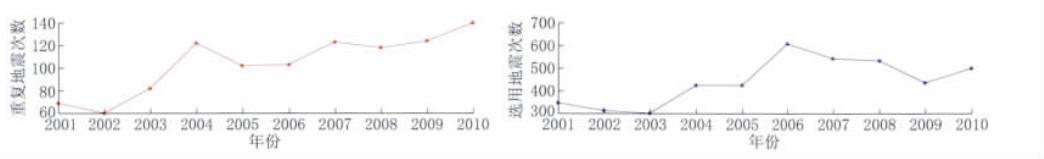


图9 2001—2010年柯坪块体重复地震与全部地震年频次的时间演化

Fig. 9 Temporal variation of the annual frequency of repeating earthquakes and earthquakes used in the study in Keping region from 2001 to 2010

2006—2009年总体地震活动频次虽然高于前期, 但全部地震年频次仍呈现逐年下降的趋势。同时2006—2008年块体内以中小地震活动为主, 无 $M_s 5.0$ 以上地震发生, 直至2009年2—4月柯坪块体内接连发生3次 $M_s 5.0$ —5.9地震。在同一时段内, 即2006—2009年, 重复地震年频次却呈现逐年上升的趋势, 重复地震比例也呈现逐年上升趋势。重复地震的增加可能表明研究区应力环境趋于一致, 这种较大范围内一致的应力场分布可能对于柯坪块体内2009年2—4月接连发生的3次 $M_s 5.0$ —5.9地震具有一定的预示意义。

4 讨论与结论

1) 鉴于研究区内7个台站数字资料时间跨度的差异, 本研究仅选用国家数字地震台网中的巴楚(BCH)、乌什(WUS)台站做重复地震的识别研究。为了剔除波形记录中高频噪声的影响, 波形互相关前对波形数据统一进行了0.5—5 Hz频率范围的带通滤波。利用波形相似的办法来挑选重复地震, 当同一组地震在方位覆盖较好的若干个台站上都取得较高相关系数时, 才应判定为重复地震。本文利用单个台站识别重复地震, 一定程度上放宽了对重复地震的要求, 因此得到的只是初步的研究结果, 对于该区域的重复地震的进一步的验证工作目前正在进程中, 将另文叙述。

2) 对本研究已识别出的重复地震的间隔时间统计表明, 间隔时间从数分钟到数百天不等, 最长重复间隔可达10年。目前多数学者认同的重复地震发生机制是在稳定的区域构造加载作用下稳滑区包围的凹凸体的重复破裂, 这种机制作用下产生的重复地震间隔时间较长, 时间跨度从几个月甚至到几年。但也有研究者发现, 有些重复地震序列之间的时间间隔很短, 仅有几天甚至几个小时, 无法用稳滑加载模型来解释(Templeton *et al*, 2008; Chen *et al*, 2009)。根据上述重复地震复发模式, 已有研究将其分为两种类型(Igarashi *et al*, 2003): 一类重复地震表现出在较长的时间内连续发生的特征, 属于频发型(continual type)重复地震; 另一类重复地震则显示仅在短时间内发生的特征, 将其称为爆发型(burst type)重复地震。Templeton等(2008)认为, 凹凸体周边的较大地震或者慢地震的发生可能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爆发特征。但也有部分爆发型重复地震没有观测到相应的触发源。综合来看, 本研究识别出的重复地震中, 既有受到稳定的区域应力加载作用下产生的频发型重复地震,

同时也存在部分机制上难以解释的爆发型重复地震。研究区重复地震的触发机制较为复杂,还有待于进一步的细化和深入研究。

3) Cheng 等(2007)对日本岛上的一条板内断裂带的研究表明,该断裂带上未发现重复地震的存在。其原因在于在经历 1984 年 Nagano 大震后,断层已完全愈合,研究区主断裂带上缺乏已破坏的薄弱地带(weak zone)。但在柯坪块体,本研究发现了比例较高的重复地震,这意味着该研究区现今仍然很脆弱,尤其是柯坪塔格断裂带内部。

4) 通过波形互相关分析,在研究区内识别出 357 组、1055 次重复地震,共组成 228 组重复地震对和 129 组多重地震对,重复地震占可用地震总数的 23.8%。在共同时段内,巴楚台和乌什台识别出的重复地震分别占可用地震总数的 21.4% 和 15.4%。两个台站识别结果的差异可能与台站分布的不同以及波形事件记录质量的差异有关。研究时段内柯坪块体西侧重复地震发生率(27.9%)明显高于东侧(19.8%),而西侧的地震活动水平也明显高于东侧。

5) 2006—2009 年总体地震活动频次虽然高于 2001—2005 年,但全部地震年频次整体呈现逐年下降的趋势。而同期重复地震年频次却呈现逐年上升的趋势,重复地震比例也呈现逐年上升趋势。分析认为,重复地震的增加可能表明研究区应力环境趋于一致,这种较大范围内一致的应力场分布可能对于柯坪块体内 2009 年 2—4 月接连发生的 3 次 $M_{S}5.0$ —5.9 地震具有一定的预示意义。

值得注意的是,重复地震是发生在同一位置的地震,因此可以通过高精度的地震定位对重复地震识别结果进行进一步的验证。然而新疆区域台网台站分布稀疏,尚无法满足用于确认严格意义上的重复地震的精确定位条件。

本项研究过程中曾与王海涛研究员、周龙泉和韩立波博士做过有益的讨论,使作者受益匪浅;周连庆博士提出了宝贵的意见和建议。作者在此一并表示诚挚的感谢。

参 考 文 献

- 程海旭, 吴开统. 1996. 断层滑动速率、地震重复时间和平均应力降[J]. 地球物理学进展, 11(1): 75—87.
- 邓起东, 冯先岳, 张培震, 杨晓平, 彭斯震, 李军. 2000. 天山活动构造[M]. 北京: 地震出版社: 257—260.
- 贾承造. 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社: 1—5.
- 蒋长胜, 吴忠良, 李宇彤. 2005. 由“重复地震”给出的中国地震台网的定位精度估计[J]. 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”及其在区域地震台网定位精度评价中的应用[J]. 地球物理学报, 51(3): 817—827.
- 李乐, 陈棋福, 钮凤林, 付虹, 刘瑞丰, 侯燕燕. 2008. 利用“重复地震”估算丽江—宁南断裂带的深部滑动速率[J]. 中国科学: D 辑, 53(23): 2925—2932.
- 李宇彤, 吴忠良, 蒋长胜, 李广平. 2008. 利用辽宁区域地震台网记录分析“重复地震”[J]. 地震学报, 30(4): 383—396.
- 林建民, 王宝善, 葛洪魁, 陈棋福, 陈颙. 2006. 重复地震及其在人工探测中的潜在应用[J]. 中国地震, 22(1): 1—9.
- 马瑾, 许秀琴. 1989. 地震重复间隔及震时位移与无震位移比值的实验研究[J]. 地震, 9(1): 10—18.
- 闵伟, 宋方敏, 韩竹军, 徐锡伟. 2006. 柯坪塔格断裂带古地震初步研究[J]. 地震地质, 28(2): 234—244.
- 曲国胜, 李亦刚, 陈杰, 宁宝坤, 李岩峰, 李军, 尹军平. 2003. 柯坪塔格推覆构造几何学、运动学及其构造演化[J]. 地学前缘, 10(特刊): 142—152.
- 冉勇康, 邓起东. 1999. 大地震重复特征与平均重复间隔的取值问题[J]. 地震地质, 21(4): 316—324.
- 闻学泽. 1999. 中国大陆活动断裂的段破裂地震复行行为[J]. 地震学报, 21(4): 411—418.

- 周龙泉, 刘桂萍, 马宏生, 华卫. 2007. 利用重复地震观测地壳介质变化[J]. 地震, 27(3): 1-9.
- Baisch S, Weidler R, Vörös R, Wyborn D, Graaf L. 2006. Induced seismicity during the stimulation of a Geothermal HFR Reservoir in the Cooper Basin, Australia[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 96(6): 2242-2256.
- Bath M. 1974. *Spectral Analysis in Geophysics*[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company: 87-94.
- Bullen M E, Burbank D W, Garver J I. 2003. Building the northern Tien Shan: Integrated thermal structural, and topographic constraints[J]. *J Geology*, 111: 149-165.
- Burbank D W, McLean J K, Bullen M E, Abdurakhmatov K Y, Miller M M. 1999. Partitioning of intermontane basins by thrust-related folding, Tien Shan, Kyrgyzstan[J]. *Basin Res*, 11: 75-92.
- Burchfiel B C, Brown E T, Deng Q, Feng X Y, Li J, Peter M, Shi J B, Wu Z M, You H C. 1999. Crustal shortening on the margins of the Tien Shan, Xinjiang, China[J]. *International Geology Review*, 41: 665-700.
- Chen K H, Nadeau R M, Rau R J. 2007. Towards a universal rule on the recurrence interval scaling of repeating earthquakes? [J]. *Geophys Res Lett*, 34, L16308, doi:10.1029/2007GL030554.
- 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]. *J Geophys Res*, 114, B05306, doi:10.1029/2007JB005518.
- Cheng X F, Niu P G, Silver S, Horiuchi K, Takai, Iio Y, Ito H. 2007. Similar microearthquakes observed in western Nagano, Japan, and implications for rupture mechanics[J]. *J Geophys Res*, 112, B04306, doi:10.1029/2006JB004416.
- Ellsworth W L, Dietz L D. 1990. Repeating earthquakes: characteristics and implications, in Proc. of Workshop, XLVI, the 7th U. S. -Japan Seminar on Earthquake Prediction, U S[R]. *Geol Surv Open-file Rept*, 90-98: 226-245.
- Evans K F, Moriya H, Niitsuma H, Jones R H, Phillips W S, Genter A, Sausse J, Jung R, Baria R. 2005. Microseismicity and permeability enhancement of hydrogeologic structures during massive fluid injections into granite at 3 km depth at the Soultz HDR site[J]. *Geophys J Int*, 160: 388-412.
- Grêt A, Snieder R. 2005. Monitoring rapid temporal change in a volcano with coda wave interferometry[J]. *Geophys Res Lett*, 32, L06304, doi:10.1029/2004GL021143.
- Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa T. 2003. Repeating earthquakes and interpolate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone[J]. *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[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 57: 935-958.
- Li A, Richards P G. 2003. Using earthquake doublets to study inner core rotation and seismicity catalog precision. *Geochim*[J]. *Geophys Geosyst*, 4(9): 1072.
- Li Y T, Wu Z L, Peng H P, Jiang C S, Li G D. 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[J]. *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[J]. *Geophys Res Lett*, 31, L13601, doi:10.1029/2004GL019833.
- Luo Y, Schuster G T. 1991. Wave-equation traveltime inversion[J]. *Geophysics*, 56(5): 645-653.
- Marquering H, Dahlen F A, Nolet G. 1999. Three-dimensional sensitivity kernels for finite-frequency traveltimes: The banana-doughnut paradox[J]. *Geophys J Int*, 137: 805-815.
- Matsuzawa T M, Uchida N, Igarashi T, Okada T, Hasegawa A. 2004. Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan[J]. *Earth Planets Space*, 56: 803-811.
- Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V. 1995. Clustering and periodic recurrence of microseismicities on the San Andreas fault at Parkfield, California[J]. *Science*, 267: 503-507.
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1997. Seismological studies at Parkfield V: Characteristic microearthquake sequences as fault-zone drilling targets[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 87(6): 1463-1472.
- Nadeau R M, Johnson L R. 1998. Seismological studies at Parkfield VI: Moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, 88: 790-814.
- Nakamura A, Hasegawa A, Hirata N, Iwasaki T, Hamaguchi H. 2002. Temporal variations of seismic wave velocity as-

- sociated with 1998 $M6.1$ Shizukuishi earthquake[J]. *Pure Appl Geophys*, **159**(6): 1183–1204.
- Niu F, Silver P G, Nadeau R M, McEvilly T V. 2003. Migration of seismic scatterers associated with the 1993 Parkfield aseismic transient event[J]. *Nature*, **426**: 544–548.
- Pandolfi D, Bean C J, Saccorotti G. 2006. Coda wave interferometric detection of seismic velocity changes associated with the 1999 $M=3.6$ event at Mt. Vesuvius[J]. *J Geophys Res*, **33**: L06306, doi:10.1029/2005GL025355.
- Poupinet G, Ellsworth W L, Frechet J. 1984. Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: An application to the Calaveras Fault, California[J]. *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[J]. *Geophys Res Lett*, **34**, L24301, doi:10.1029/2007GL031622.
- Roberts P M. 1991. Development of active doublet method for monitoring small changes in crustal properties[J]. *Seism Res Lett*, **62**: 36–37.
- Rubin A M, Gillard D. 2000. Aftershock asymmetry/rupture directivity among central San Andreas fault microearthquakes[J]. *J Geophys Res*, **105**: 19095–19109.
- Rubin A M. 2002. Using repeating earthquakes to correct high-precision earthquake catalogs for time-dependent station delays[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **5**: 1647–1659.
- Savage J C, Cockerham R S. 1987. Quasi-periodic occurrence of earthquakes in the 1978–1986 Bishop–Mammoth Lakes Sequence, eastern California[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **77**(4): 1347–1358.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China[J]. *Science*, **303**: 1176–1178.
- Schaff D P, Waldhauser F. 2005. Waveform cross-correlation-based differential travel-time measurements at the Northern California Seismic Network[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **95**(6): 2446–2461.
- Schaff D P, Richards P G. 2011. On finding and using repeating seismic events in and near China[J]. *J Geophys Res*, **116**, B03309, doi:10.1029/2010JB007895.
- Snieder R, Hagerty M. 2004. Monitoring change in volcanic interiors using coda wave interferometry: application to Arenal Volcano, Costa Rica[J]. *Geophys Res Lett*, **31**: L09608, doi:10.1029/2004GL019670.
- Tapponnier P, Molnar P. 1997. Active faulting and tectonics in China[J]. *J Geophys Res*, **82**: 2905–2930.
- Templeton D, Nadeau R M, Bürgmann R. 2008. Behavior of repeating earthquake sequences in central California and the implications for subsurface fault creep[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **98**(1): 52–65.
- Templeton D C, Nadeau R M, Bürgmann R. 2008. Behavior of repeating earthquake sequences in Central California and the implications for subsurface fault creep[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **98**(1): 52–65, doi:10.1785/0120070026.
- Uchida N, Matsuzawa T, Ellsworth W L. 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[J]. *Geophys Res Lett*, **34**, L20313, doi:10.1029/2007GL031263.
- Uchida N, Matsuzawa T, Nakajima J, Hasegawa A. 2010. Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes[J]. *J Geophys Res*, **115**, B07309, doi:10.1029/2009JB006962.
- Vidale J E, Ellsworth W L, Cole A, Marone C. 1994. Variations in rupture process with recurrence interval in a repeated small earthquake[J]. *Nature*, **368**: 624–626.
- Wallance R E. 1970. Earthquake recurrence intervals on the San Andreas fault[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **81**: 2875–2890.
- 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]. *J Geophys Res*, **113**, B08316, doi:10.1029/2007JB005189.
- Zhang J, Song X D, Li Y C, Richards P G, Sun X L, Waldhauser F. 2005. Inner core differential motion confirmed by earthquake waveform doublets[J]. *Science*, **309**: 1357. doi:10.1126/science.1113193.

作者简介



杨兴悦 甘肃省地震局工

程师. 2012 年中国地震局兰州地震研究所固体地球物理专业毕业, 获理学硕士学位. 曾从事台站地震监测和青藏高原强震数值模拟方面的研究. 现从事地震监测预测研究方面的

工作. 甘肃省地震学会会员.



钱小仕 防灾科技学院讲师. 2003 年淮北煤炭师范学院数学系数学与应用数学专业毕业, 获理学学士学位; 2009 年南京师范大学数学科学学院概率论与数理统计专业毕业, 获理学硕士学位. 现从事极值

理论及其应用研究.



方 炜 陕西省地震局高级工程师. 2002 年兰州地震研究所固体地球物理专业毕业, 获理学硕士学位. 主要从事地球内部结构、地震预测与地震电磁学方面的研究工作. 中国地球物理学会会员.



谢俊举 中国地震局地球物理研究所副研究员. 2010 年中国地震局地球物理研究所毕业, 获理学博士学位. 主要从事强震地面运动、近断层地震动对结构的影响以及近场强震动模拟研究. 中国地震学会会员.



唐兰兰 新疆维吾尔自治区地震局工程师. 2003 年新疆大学建筑工程学院测绘专业毕业, 获工学学士学位; 2007 年新疆大学资源与环境工程学院地球探测与信息技术专业毕业, 获工学硕士学位. 主要从事数字地震学和综合预报方法的研究工作.



李 琳 哈尔滨学院工学院土木系讲师, 中国地震局工程力学研究所在读博士研究生. 2007 年沈阳建筑大学土木学院固体力学专业毕业, 获工学硕士学位. 现主要从事地震地面运动记录的工程选取工作.