

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2010.03.018

## 利用重复地震估算北京平原地区 隐伏断裂深部的活动速率

李 乐 陈棋福

(中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

**摘 要** 利用首都圈数字化地震台网 2001—2006 年的波形资料分析北京平原地区隐伏断裂的深部滑动速率。通过波形互相关分析,识别出 35 组相似地震对和 20 组多重相似对,大部分相似地震活动表现为非周期性,重复间隔从数分钟到数百天不等。针对研究区内台站分布稀疏和低信噪比波形记录的现状,在波形相似的基础上,提出了采用在子采样条件下的 S-P 相对到时差 ( $dSmP$ ) 和相对到时拾取误差来对相似地震震源位置的一致性进行强约束,进一步探索和完善波形意义上重复地震的识别方法。基于 4 组“重复地震”估算北京平原黄庄-高丽营断裂和南口-孙河断裂在不同孕震深度处的滑动速率为  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ ,怀安镇盆地南缘断裂地表以下  $9.4 \text{ km}$  处的滑动速率估计值为  $1.5 \text{ mm/a}$ ,这一结果和地质资料结果相符。

**关键词** 隐伏断裂 重复地震 滑动速率 北京平原地区

**中图分类号**: P315.2

**文献标识码**: A

**文章编号**: 0253-4967(2010)03-0508-12

### 0 引言

北京平原地区的地震构造以隐伏活动断裂及其控制的隐伏断陷盆地为主,这些隐伏构造具有较强的构造活动性,它们不但控制了该区的破坏性强震的发生,同时还引起了其他的地质灾害现象(高文学等,1993)。北京平原地区的隐伏断裂一直为人们所关注,但由于平原地区的隐伏活动断裂位于人类聚集地,大都隐伏于第四系松散层之下,无地表露头可见,难以准确地获得隐伏活动断裂的同震地表破裂特征和断裂长期滑动习性等表征活动断裂与地震关系的定量参数,而对于有关隐伏断裂活动的定量研究如滑动速率等参考资料也寥寥无几。

近年来,随着数字化地震观测资料的累积,利用重复地震的概念研究断层深部活动、震源物理、介质物性变化等相关工作成为国内外研究的热点问题,而具有高度相似波形的重复地震分析也成为数字地震学研究的一个新的和重要的发展方向。有关重复地震发生机理的数值模拟、理论分析和实验力学等研究(Anooshehpour *et al.*, 2001; Beeler *et al.*, 2001; Sammis *et al.*, 2001; John *et al.*, 2002)表明,周围有蠕滑特性物质存在的、在空间上相互独立的凹凸体在周围稳定蠕滑的加载下有可能会发生重复破裂。由此,重复地震的孕育发生过程其实反映了其周围蠕滑(无震滑动)区域的活动过程和应变积累状态。在小震复发行为的研究过程中,在板块边缘主要断裂带的蠕滑区(如 Parkfield 地区、土耳其的 Anatolian 断层、台湾的池上断层)和俯冲带上相

〔收稿日期〕 2010-02-24 收稿,2010-07-21 改回。

〔基金项目〕 中国地震局地震预测研究所基本科研业务专项(02092405)资助。

继发现了在同一断层位置上重复发生的小震活动 (Vidale *et al.*, 1994; Nadeau *et al.*, 1995; Igarashi *et al.*, 2003; Peng *et al.*, 2005; Rau *et al.*, 2007), 研究者将这些在不同构造条件下发现的、在同一断层位置上发生的、具有高度相似波形的一组地震称为重复地震。Nadeau 等 (1999) 首次利用发生在 San Andreas 断层 Parkfield 地区的重复地震的地震矩和重复间隔成功地估算了地表以下不同深度的断层滑动速率来描述断层深部的变形行为, 这一成功应用为分析断层深部的滑动速率提供了新的方法。

与板缘地震相比, 对板内小震复发行为的研究起步较晚。Schaff 等 (2004) 通过对远震波形资料的分析, 指出中国境内发生的地震约有 10% 是重复地震。Li 等 (2007) 通过首都圈地区密集数字地震台网的波形分析, 识别出 1 组破裂面积相互重叠的重复地震, 并利用重复地震估算出了唐山断裂带地下深约 15km 处的断层滑动速率; 笔者同时指出唐山断裂带作为 1976 年唐山大地震的主控断裂, 现已成为一条能够引发重复地震的成熟断裂带。对于云南地区主要断裂带的重复地震研究也在进一步展开, 结果亦发现了不少波形意义上的重复地震 (李乐, 2008; 李乐等, 2008)。李乐等 (2008) 研究了现代地震活动频繁且相继发生了 7.0 级和 6.2 级地震的丽江-宁蒗断裂带, 并估算出深约 23km 处脆韧性转换带的滑动速率约为 5 mm/a。上述研究的成功实例为进一步研究北京平原地区主要隐伏断裂带的深部滑动速率和变形行为提供了有利的基础。

本文则基于首都圈数字化台网的波形资料分析识别北京平原地区的“重复地震”, 并由此来估算北京平原地区相关隐伏断裂在不同孕震深度处的滑动速率, 以弥补缺少北京地区隐伏断裂滑动速率资料的不足, 为今后的地震危险性分析提供实用信息。

## 1 北京地区的地质构造背景

首都圈平原地区位于华北盆地的北缘, 受伸展正断层控制的掀斜块在区域应力的作用下, 形成了典型的盆-岭式构造。主要包括北京、天津及其周边的河北省部分地区, 是潮白河和永定河两大水系的冲洪积平原地区, 地势西北高东南低。构造格局是在新近纪“二隆夹一凹” (京西隆起、大兴隆起和北京凹陷) 的基础上发展起来的, 第四纪以来这一总的格局解体 (焦青等, 2006)。沙河凹陷在第四纪开始发育; 整个北京凹陷反向抬升, 与大兴隆起结为一体; 大兴隆起北部则发育了顺义第四纪凹陷 (焦青等, 2006)。北京地区的活动构造包括第四纪隐伏活动断裂和隐伏断陷盆地, 具有明显的新生性的基本特征; 受燕山运动的影响, NE, NW 向 2 组断裂为区内的主干断裂; 隐伏于第四系松散层之下的夏垫断裂和南口-孙河断裂是北京平原地区北部 2 条重要的隐伏活动断裂 (焦青等, 2006)。夏垫断裂位于北京平原地区的东北部, 曾于 1679 年发生过三河-平谷 8 级地震; 南口-孙河断裂斜穿北京平原的西北部, 是北京地区规模最大的 1 条 NW 向断裂, 该断裂周缘伴有多期古地震事件发生; 黄庄-高丽营断裂是横穿北京市城区的 1 条 NE 向、具有正断倾滑性质的晚更新世活动隐伏断裂。

## 2 数据分析

首都圈地震台网在数字化改造完成后于 2001 年 10 月开始运行。首都圈数字化地震台网由 107 个数字地震台站组成, 分别安装了宽带、甚宽带、井下短周期和地面短周期等仪器 (图 1), 平均台站间距约 30km, 是全国最为密集的区域地震台站。因台网东南部的第四系覆盖甚



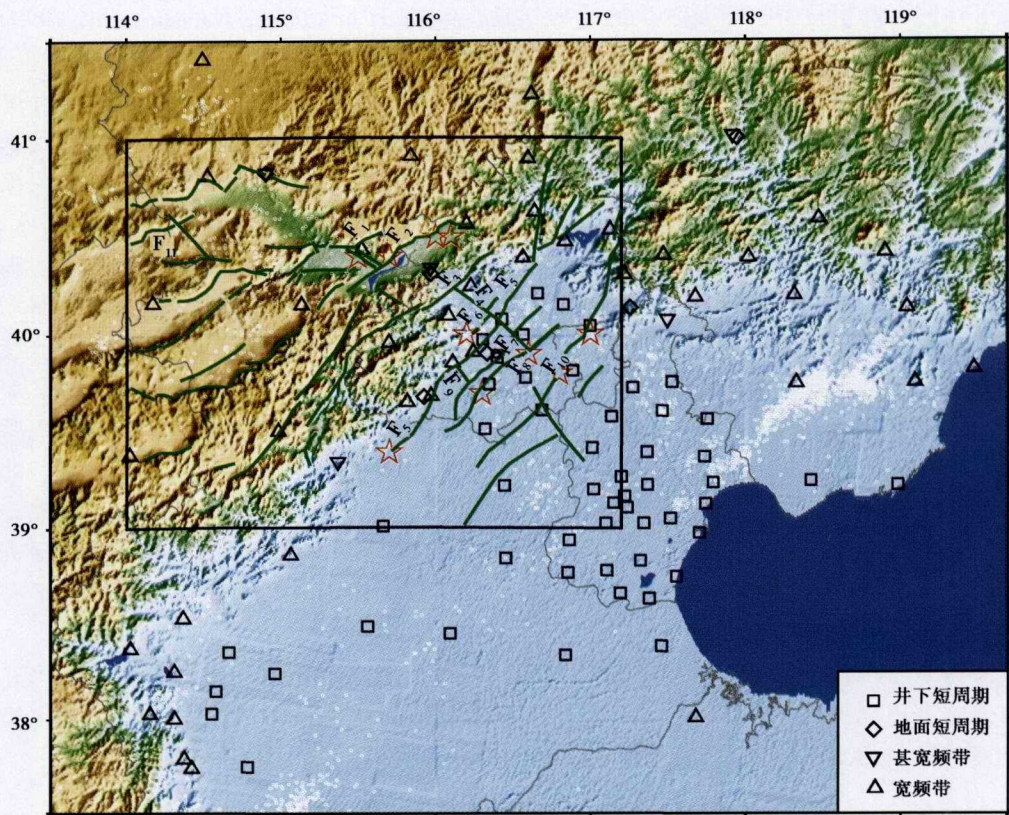


图1 首都圈地区地震构造、数字化地震台网和地震分布图

Fig. 1 Geographic map showing seismicity, major faults, and the Beijing Digital Seismic Network (BSN) stations.

黑色方框表示研究区的范围,线段表示断裂(据徐锡伟等,2002),三角、倒三角、方块和菱形分别代表宽频带、甚宽频带、井下短周期和地面短周期地震台站;白圈代表2001—2006年首都圈数字化地震台网记录到的地震,星状表示研究区内历史上发生的6级以上的地震;断裂名称: $F_1$ 怀涿次级盆地北缘断裂, $F_2$ 延矾次级盆地北缘断裂, $F_3$ 南口山前断裂, $F_4$ 南口-孙河断裂, $F_5$ 黄庄-高丽营断裂, $F_6$ 小汤山-东北旺断裂, $F_7$ 顺义-良乡断裂, $F_8$ 大兴-通县断裂, $F_9$ 永定河断裂, $F_{10}$ 夏垫新断裂, $F_{11}$ 怀安镇盆地南缘断裂

厚,尽管采用了井下观测技术,由于井深达不到底层基岩,所记录的信噪比仍达不到地表基岩露头好的台站的水平。

本研究中收集了首都圈数字化地震台网(2001年10月至2006年12月)的地震波形资料和观测报告。如图1黑色方框所示的研究区域包括延怀盆地、北京地区、三河-平谷地震区。在观测报告中挑选出北京及其周缘地区( $39.0^{\circ} \sim 41.0^{\circ}N$ ,  $114.0^{\circ} \sim 117.2^{\circ}E$ )的地震,总共有996次,其震级分布范围为 $M_L 0.1 \sim 4.4$ ,其中可用波形的地震有716次。将挑选出的地震的波形由原始的SEED格式转换为SAC格式,在进行互相关分析之前统一对波形资料做预处理,具体作法是:首先,对选取的地震波形进行1~10Hz的带通滤波。为避免台网每秒50点采样率的限制而获取高精度的走时差资料,采用在频域补零而波形在时域进行内插的方法,内插后的采样间隔0.312 5ms即为相对到时的估计误差,并对波形去平均,去线性趋势和尖灭。



### 3 “重复地震”的识别

经过波形的互相关分析,得到了相关系数 $\geq 0.8$ 的地震对有 260 对。若把至少有 1 个台站记录到的 P 波之前 1s 至 S 波后 5s 的时间窗内具有 0.8 以上相关系数的 1 组地震定义为相似地震,则可以确定 55 组相似地震,见图 2。其中包括 35 组由 2 个地震构成的相似地震对(doublet)和 20 组由 2 个以上地震构成的多重相似对(multi-plet),总共有 162 次地震,震级范围  $M_L 0.4 \sim 3.0$ 。本研究得到的相似地震分布与蒋长胜等(2008)得到的首都圈地区的“重复地震”(相应于本文的相似地震),虽然进行波形相关的长短时间窗和带通滤波的频段有所差异,但在本研究区的分布图像大体一致,多分布在主要活动构造带上。在得到的每组相似地震中,相邻地震活动的间隔有着明显的变化,跨度从数分钟到数百天不等。图 3 示意给出了其中一组相似地震的波形。

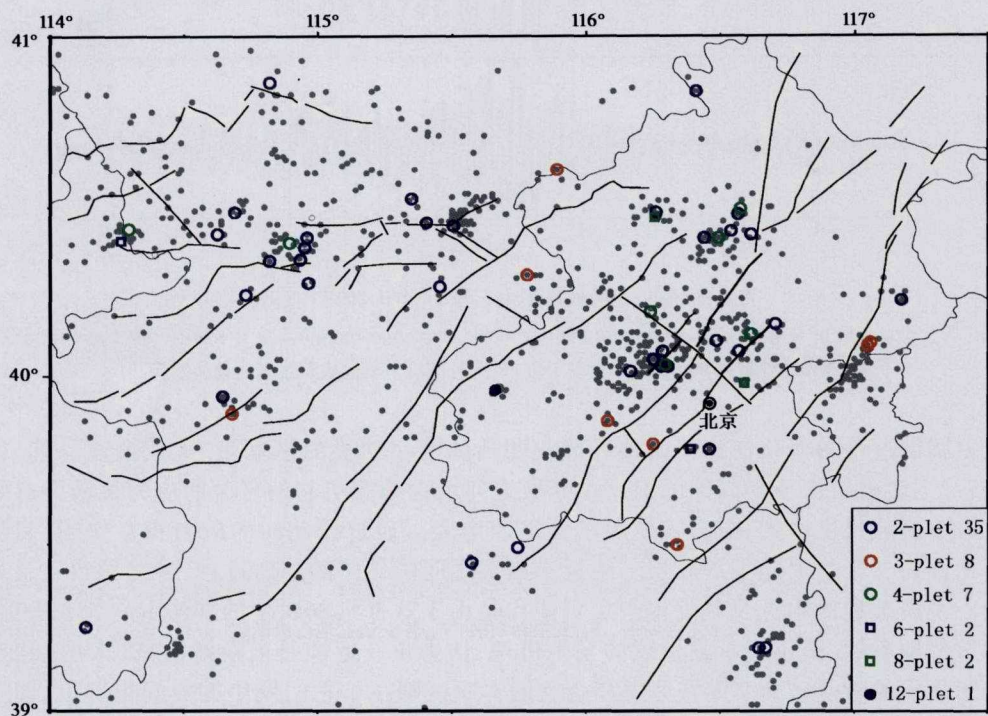


图 2 55 组相似地震分布图

Fig. 2 Map view of the locations of 55 identified similar events sequences.

不同的颜色和形状代表包含不同地震数的相似地震;图例中前 1 列数表示相似地震中所包含的地震个数,最后 1 列数表示相应的相似地震的组数

研究表明(Rubin *et al.*, 2000; Cheng *et al.*, 2007),除重复地震外,一些余震(aftershock)或称为相邻地震的波形也具有较高的相似性。Yamashita 等(1987)提出了余震产生的 2 种可能机制。其一,在 1 次主震发生的过程中,大部分主破裂面上产生较大的滑动位移量,然而在某些存在闭锁区或凹凸体的断层表面上产生的滑动量或者为零,或者可以忽略。主震后某一时间内类

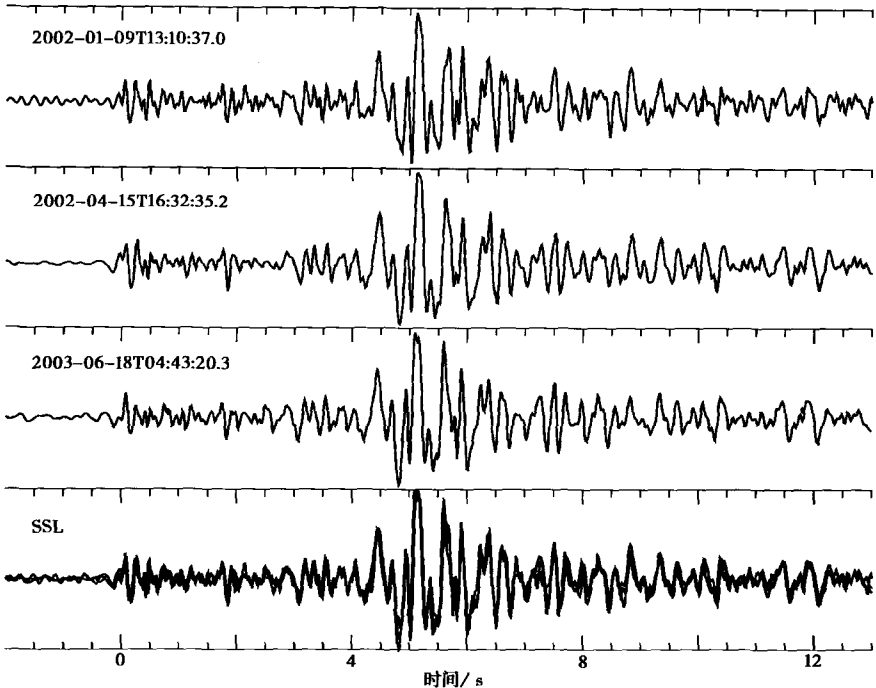


图3 北京地区的相似地震在十三陵台(SSL)的归一化波形示例

Fig. 3 Example of seismograms from one similar event sequence recorded at the broadband station SSL.

地震的发病时间标在波形的左上方,最下行给出了相似地震波形的叠加结果

似于应力腐蚀过程的弱化使这些闭锁区域或凹凸体产生明显的滑动量,形成余震。其二,在一次大震后,主震破裂面及其周围的附属小断层之间由大地震引起的显著的应力扰动会有强烈的集中。由于裂隙尺度增大,应力强度因子会迅速增大。通过彼此间的应力相互作用,裂纹将趋向于互相合并。于是引起主震断层与附近小断层之间障碍体的削弱过程,最终导致一系列余震的发生。主震破裂面附近及其外围余震可能均是由于这种机制发生的。Nadeau 等(1998)在发现板间重复地震后,提出了重复地震的发生机理,认为重复地震是被稳滑区域(大的蠕变区)包围的强凹凸体的重复破裂;重复地震和余震的本质区别在于它们发生的空间位置上,即重复地震的破裂区域几乎是重叠的,而余震则是彼此分开的。

一般而言,相似地震可能同时包括重复地震和相似余震,从而导致每组相似地震中的地震重复间隔和地震震级的明显变化。为了在相似地震中进一步识别重复地震,通常要进行地震的精确定位。在研究区的东南部,如图1所示,首都圈数字地震台网分布多为井下短周期台,很多台站记录的信噪比较低。宽频带台站的单侧分布和井下短周期台站的低信噪比给研究区内的相似地震精确定位带来了很大的困难,也不可能满足相对精确定位(Li *et al.*, 2007)要求相似地震中每个地震至少有3个台站都记录到了到时数的条件,从而也无法进行精确定位来进一步确定重复地震。

鉴于上述局限和现有的观测条件,本研究采用如下原则来进一步筛选多重相似对:

(1)相似地震的全波段的相关系数在0.9以上。通过波形互相关系数的高阈值来确保波

形的一致性；

(2)平均的重复间隔 $>50\text{d}$ 。通过重复间隔阈值的约束在一定程度上排除了相似余震的干扰。根据活动地块的划分原则(张培震等,2002),虽然活动地块的边界带具有强烈的构造活动性,但地块内部的构造变形具有协调性和整体性,活动地块以整体运动和变形为特征,即使内部具有一定的构造活动性,其运动和变形在整个大活动地块框架下也具有统一性和协调性。GPS观测结果表明华北平原正经历着整体向E的运动,其速率为 $7\text{ mm/a}$ (张培震等,2003)。根据华北地块的加载速率,可以估算出华北地块发生 $M_{\text{L}}0.4$ 地震的重复间隔下限至少为 $50\text{d}$ 。

(3)亚采样条件下S-P的相对到时差 $|dSmP|<10\text{ms}$ ,相对到时拾取误差 $<0.5\text{ms}$ 。通过对相对到时差 $dSmP$ (图5)及相对到时拾取误差的约束来进一步确保所选取地震在空间位置上的一致性。

在定位过程中为了避免发震时间和震源位置的折衷,通常采用S-P的相对到时差 $dSmP$ 来反演震源的相对位置(Cheng *et al.*,2007)。在理想条件下,排除波形记录中噪声的干扰、地震波传播介质和记录仪器的性能变化等的影响,重复地震的破裂面积是完全重叠的,即表现为每组地震中两两波形互相关系数 $cc=1$ ,两两波形的S-P的相对到时差 $dSmP=0$ ;而对于台站实际记录到的地震波形,考虑到噪声、震源等干扰的客观存在,在识别重复地震的过程中尽量要求

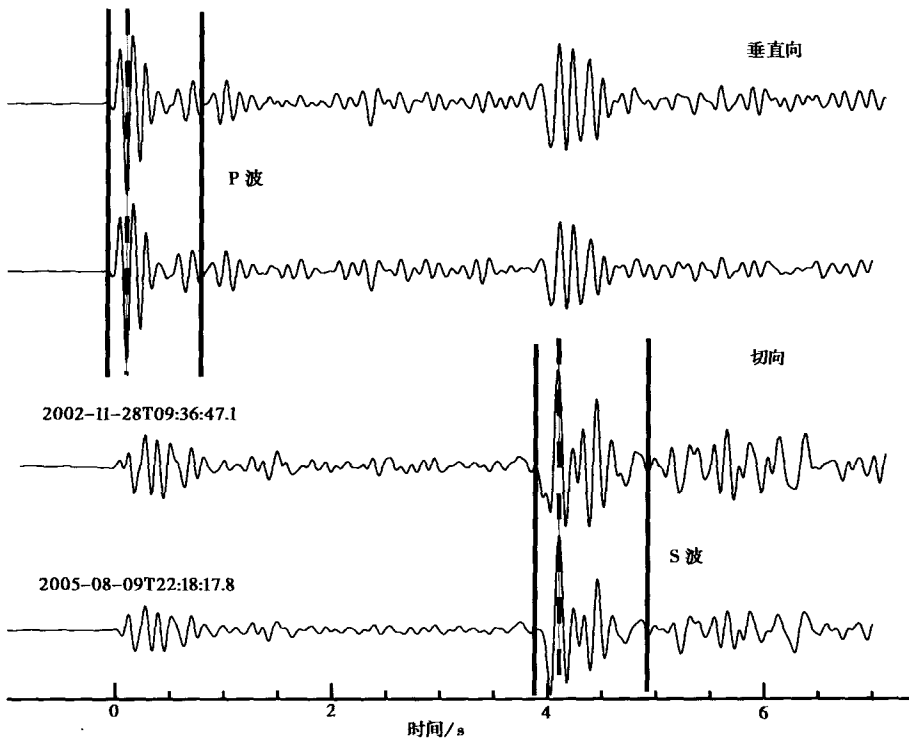


图4 阳原台(YAY)的地震对记录

Fig. 4 Examples of seismograms of two similar events recorded at station YAY.

P波段和S波段的互相关延时估计分别在垂直向和切向分量上量取；

垂直的实线示意给出了进行相关计算的窗长,虚线示意给出了相应时间窗内相关系数的峰值处

$dSmP$  的值足够小,从而尽可能保证震源位置的一致性。

计算  $dSmP$  的具体做法:首先综合考虑每个地震事件波形记录的台站数以及信噪比,在每组地震中选出 1 个地震事件做为参考地震。以参考地震的记录波形为准,如图 4 所示组里的其它地震波形分别与参考地震在 P 波段和 S 波段进行互相关计算,获取互相关系数  $cc$  以及 P 波段和 S 波段的相对延时,两者之差即为相对到时差  $dSmP$ 。图 5 展示了挑选出的 4 组具有高相关系数的相似地震的  $dSmP$  的计算结果为  $0.3 \sim 9.3\text{ms}$ 。

当 2 个波形比较相似时,互相关延时估计中信噪比 SNR 是惟一控制相对时间测量精度的参数,而在离散化误差远远小于其他干扰源时,采样率对测量精度没有影响。这一观点为本研究通过内插获取子采样精度(subsample precision)提供了理论依据,同时也可以通过子采样的精度来衡量时延(Cheng *et al.*, 2007)。对于 1 组多重相似对可以采用下述方法来衡量相对到时拾取误差:例如有 3 个地震的多重相似对,两两做互相关延时估计,可以获得 3 个 S-P 的相对到时差,即  $\Delta T_{12}^0$ 、 $\Delta T_{13}^0$  和  $\Delta T_{23}^0$ ,上述 3 个时差只有 2 个是独立的,也就是说可以通过其中的任意 2 个来计算第 3 个时差,如由  $\Delta T_{12}^0$ 、 $\Delta T_{13}^0$  来计算获得  $\Delta T_{23}^0$ ,由此互相关延时估计所得  $\Delta T_{23}^0$  和计算所得  $\Delta T_{23}^0$  的差值可以作为相对到时拾取误差的指标。一般而言,量级为  $0.1\text{ms}$  的延时误差相当于数米的定位误差。由此设定到时拾取误差为  $0.5\text{ms}$  时,定位误差最多为数十米。

本文将满足上述条件的多重相似对称之为“波形意义上”的重复地震,即“重复地震”。通过严格筛选,最终只有 4 组由 3 个地震构成的“重复地震”,见表 1。

#### 4 滑动速率估算

要获取地震破裂尺度、地震发生的重复周期以及断层滑动速率,对地震大小的客观衡量是必需的。首都圈数字地震台网常规地震定位过程中的震级采用的是里克特震级,通常以伍德-安德森地震仪为标准,根据仪器响应对数字波形记录进行积分,再进行地震波随距离衰减的校准而得。

本研究首先采用谱比法(Vidale *et al.*, 1994)来检验观测报告中确定的地震震级(近震震级  $M_L$ )。具体做法如下:对每个台站记录的地震波形资料,选取从 P 波开始的 20s 时间窗(包括 S 波)计算振幅谱,然后通过叠加和归一化得到每个台站的归一化谱,即谱比。最后通过计算频带

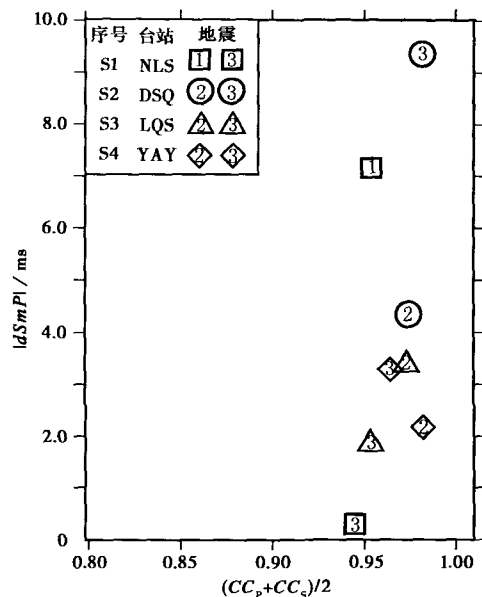


图 5 相对到时差  $|dSmP|$  与互相关系数分布图  
Fig. 5 The differential S minus P time( $dSmP$ ) and cross correlation coefficients statistics for repeating earthquakes sequences.

$(CC_p + CC_s)/2$  代表每个地震序列中其他地震相对于参考地震的 P 波段和 S 波段的互相关系数的平均值;方块、圆圈、三角和菱形分别与表 1 所示 S1、S2、S3 和 S4 4 组“重复地震”相对应,带有数字的符号表示地震序列中相对应的地震

表 1 北京平原地区的“重复地震”计算结果

Table 1 Results from repeating earthquakes in Beijing plain area

序列号	地震 序号	日期 (年-月-日)	时间 (时:分:秒)	$ dSmP $ /ms	震级 $M_L$	破裂半径 /m	滑动量 /mm
S1	1	2002-01-09	13:10:37.00	7.2	1.4	28.5	2.1
S1	2	2002-04-15	16:32:35.20	0	2.3	80.3	5.8
S1	3	2003-06-18	04:43:20.30	0.3	1.1	20.2	1.5
S2	1	2002-01-04	16:09:06.20	0	1.3	25.4	1.8
S2	2	2002-01-09	16:45:10.80	4.3	0.8	14.3	1.0
S2	3	2003-12-22	20:10:41.60	9.3	1.5	32.0	2.3
S3	1	2002-12-27	06:42:01.20	0	1.1	20.2	1.5
S3	2	2003-02-13	06:11:41.70	3.4	0.7	12.7	0.9
S3	3	2004-09-14	03:47:07.00	1.9	1.2	22.6	1.6
S4	1	2002-11-26	09:48:08.00	0	1.7	40.2	2.9
S4	2	2002-11-28	09:36:47.10	2.2	2.3	80.3	5.8
S4	3	2005-08-09	22:18:17.80	3.3	2.0	56.8	4.1

注 相应地震序列的震源位置中值(纬度,经度,震源深度)与滑动速率分别为,S1: 40.117 4°N, 116.587 8°E, 13.8km; 1.2mm/a。S2: 40.049 3°N, 116.272 0°E, 19.1km; 1.2mm/a。S3: 39.886 0°N, 116.084 9°E, 6.7km; 1.0mm/a。S4: 40.433 8°N, 114.289 0°E, 9.4km; 1.5mm/a。

1~10Hz 谱比的平均值来确定相对地震矩。图 6 给出了计算的相对地震矩  $M_0$  和震级  $M_L$  的关系,两者呈很好的线性关系,这与陈培善等(1991)指出的近震震级和矩震级的线性相关性是一致的,说明可用观测报告中的震级来估算地震矩(图 6)。

因此,本研究采用 Hanks 等(1979)提出的地震矩-震级关系:

$$\log M_0 = 16.1 + 1.5M \tag{1}$$

进行近震震级  $M_L$  和地震矩  $M_0$  之间的换算。并基于圆盘破裂断层模型,在地震应力降  $\Delta\sigma$  设定为常量的条件下(这里选用 3MPa),采用 Kanamori 等(1975)提出的关系式估算地震的破裂半径  $r$ :

$$r = \left( \frac{7M_0}{16\Delta\sigma} \right)^{1/3} \tag{2}$$

然后根据地震矩的定义来计算断层滑动量

$$d = M_0 / \mu \pi r^2 \tag{3}$$

式(3)中剪切模量  $\mu$  取  $3 \times 10^{10}$  N/m<sup>2</sup>。

如图 7 和表 1 所示,由 4 组“重复地震”估算出的北京地区的滑动速率为 1.0~1.5 mm/a。徐锡伟等(2002)根据地质资料和古地震复发资料给出了北京平原地区隐伏断裂的滑动速率,其中黄庄-高丽营断裂和南口-孙河断裂的滑动速率分别为 1.0mm/a 和 0.3mm/a;汪良谋等(1990)通过

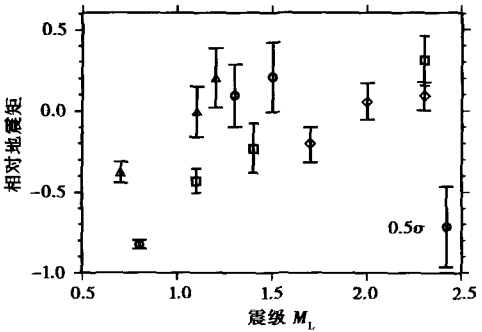


图 6 相对地震矩与近震震级  $M_L$  分布图

Fig. 6 Relative moment ratios shown as a function of local magnitude  $M_L$ .

展示了相对地震矩与近震震级之间的线性关系;方块、圆圈、三角和菱形分别与表 1 所示 S1、S2、S3 和 S4 4 组“重复地震”相对应



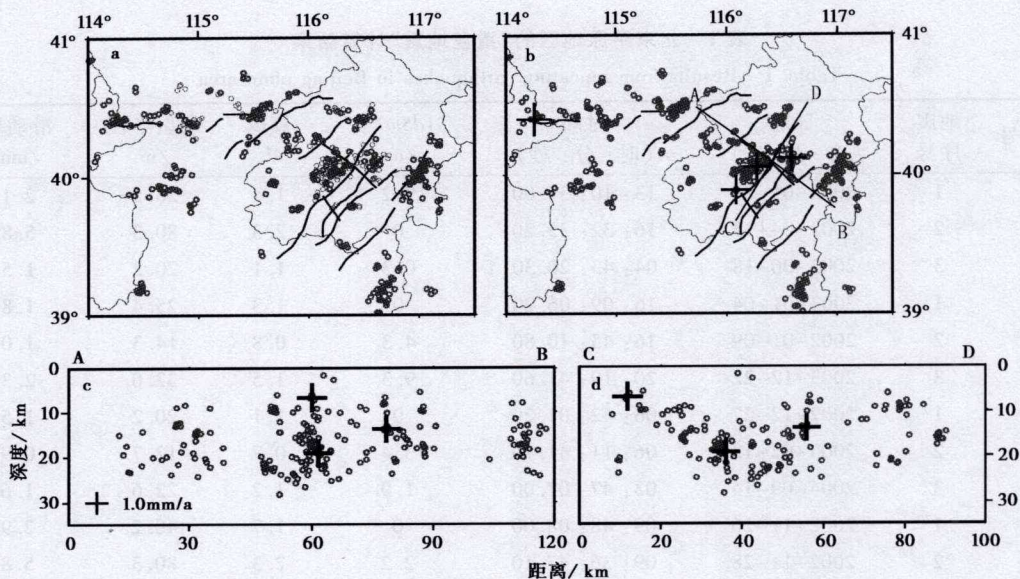


图 7 重新定位前后的地震震中分布和震源深度剖面

Fig. 7 A comparison of BSN catalog locations and relocated seismicity.

a 地震观测报告中的震中分布; b 双差定位后的震中分布; c AB 剖面的震源深度分布; d CD 剖面的震源深度分布; 不同大小的十字代表由“重复地震”估算出的滑动速率,与表 1 中的 4 组“重复地震”相对应

形变测量的资料分析提出南口-孙河断裂具有一定的活动性,其活动速率为  $0.8 \sim 1.5 \text{ mm/a}$ 。如图 5 所示,3 组“重复地震”位于黄庄-高丽营断裂和南口-孙河断裂附近,在孕震深度  $6.7 \text{ km}$ 、 $13.8 \text{ km}$  和  $19.1 \text{ km}$  处的滑动速率为  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ ,这一估计与地质资料给出的结果相当。

地质资料提供怀安镇盆地南缘断裂的年滑动速率约为  $0.37 \text{ mm/a}$  (徐锡伟等,2002),如图 7 所示,惟一的一组“重复地震”给出的怀安镇盆地南缘断裂在地表以下  $9.4 \text{ km}$  处的滑动速率估计值为  $1.5 \text{ mm/a}$ ,这一估计值与地质滑动速率差异不大。

综合上述分析认为,北京平原地区的隐伏断裂活动较为稳定,断裂深部和浅部的活动状态较为一致,滑动速率估值大约为  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ 。

## 5 结论

通过对首都圈数字化区域地震台网 2001—2006 年的波形资料分析得到如下结论:

(1) 通过波形互相关分析,识别出 35 组相似地震对和 20 组多重相似对,大部分相似地震活动表现为非周期性,相邻地震活动的间隔从数分钟到数百天不等。

(2) 基于 4 组“重复地震”估算北京平原地区黄庄-高丽营断裂和南口-孙河断裂在不同孕震深度处的滑动速率为  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm/a}$ ,怀安镇盆地南缘断裂地表以下  $9.4 \text{ km}$  处的滑动速率估计值为  $1.5 \text{ mm/a}$ ,这一结果和地质资料结果相符。

(3) 基于波形互相关延时估计,采用在子采样条件下 S-P 相对到时差 ( $dSmP$ ) 和相对到时拾取误差来对相似地震震源位置的一致性进行强约束,进一步探索和完善了波形意义上重复地

震的识别方法。

(4) 分析和利用“重复地震”估算断层深部的滑动速率, 估算值相对稳定, 与地质资料和形变观测资料较为相符, 表明所采用的估算方法具有可行性。

感谢首都圈数字地震台网提供的事件波形资料和观测报告。

## 参 考 文 献

- 陈培善, 白彤霞. 1991. 震源参数之间的定量关系 [J]. 地震学报, 13(4): 401—411.
- CHEN Pei-shan, BAI Tong-xia. 1991. Quantification relations between the source parameters [J]. Acta Seimoloigca Sinica, 13(4): 401—411 (in Chinese).
- 高文学, 马瑾主编. 1993. 首都圈地震地质环境与地震灾害 [M]. 北京: 地震出版社.
- GAO Wen-xue, MA Jin (eds). 1993. Seismo-geological Background and Earthquake Hazard in Beijing Area [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 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.
- JIANG Chang-sheng, WU Zhong-liang, LI Yu-tong. 2008. Estimating the location accuracy of the Beijing Capital Digital Seismograph Network using repeating events [J]. Chinese Journal of Geophysics, 51(3): 817—827 (in Chinese).
- 焦青, 邱泽华. 2006. 北京平原地区主要活动断裂带研究进展 [A]. 见: 中国地震局地壳应力研究所编. 地壳构造与地壳应力集(18). 北京: 地震出版社. 72—84.
- JIAO Qing, QIU Ze-hua. 2006. Research progress of major active faults in Beijing plain area [A]. In: Institute of Crustal Dynamics, CEA (ed). Crustal Tectonics and Crustal Stress (18). Seismological Press, Beijing. 72—84 (in Chinese).
- 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 [J]. 科学通报, 53(23): 2925—2932.
- LI Le, CHEN Qi-fu, NIU Feng-lin, et al. 2008. Slip rate along the Lijiang-Ninglang Fault zone estimated from repeating earthquakes [J]. Chin Sci Bull, 53(23): 2925—2932 (in Chinese).
- 李乐. 2008. 板内重复地震的识别及其在活动断裂带的应用研究 [D]: [学位论文]. 北京: 中国地震局地球物理研究所.
- LI Le. 2008. Identification of Intra-plate Repeating Microearthquakes and its Application to the Active Fault Zone [D]. [Doctoral Dissertation]. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing (in Chinese).
- 汪良谋, 徐杰, 黄秀铭, 等. 1990. 北京拗陷构造活动性分析 [J]. 中国地震, 6(2): 25—36.
- WANG Liang-mou, XU Jie, HUANG Xiu-ming, et al. 1990. An analysis on the tectonic activities in Beijing down-warped basin [J]. Earthquake Research in China, 6(2): 25—36 (in Chinese).
- 徐锡伟, 吴卫民, 张先康, 等. 2002. 首都圈地区地壳最新构造变动与地震 [M]. 北京: 科学出版社.
- XU Xi-wei, WU Wei-min, ZHANG Xian-kang, et al. 2002. Latest Crustal Tectonic Motion and Earthquakes in Big Beijing Area [M]. Science Press, Beijing (in Chinese).
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造变形的 GPS 速度场和活动地块 [J]. 地学前缘, 9(2): 430—441.
- ZHANG Pei-zhen, WANG Qi, MA Zong-jin. 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China [J]. Earth Science Frontiers, 9(2): 430—441 (in Chinese).
- 张培震, 邓起东, 张国民, 等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块 [J]. 中国科学(D 辑), 33(增刊): 12—20.

- ZHANG Pei-zhen, DENG Qi-dong, ZHANG Guo-min, *et al.* 2003. Active tectonic blocks and strong earthquakes in the continent of China [J]. *Sci China (Ser D)*, 33(Suppl): 12—20.
- Anooshehpour A, Brune J N. 2001. Quasi-static slip-rate shielding by locked and creeping zones as an explanation for repeating earthquakes at Parkfield [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(2): 401—403.
- 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 [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(6): 1797—1804.
- Cheng X, Niu F, Silver P G, *et al.* 2007. Similar microearthquakes observed in western Nagano, Japan, and implications for rupture mechanics [J]. *J Geophys Res*, 112, B04306. doi: 10.1029/2006JB004416.
- Hanks T C, Kanamori H. 1979. A moment magnitude scale [J]. *J Geophys Res*, 84: 2348—2350.
- Igarashi T, Matsuzawa T, Hasegawa A. 2003. Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone [J]. *J Geophys Res*, 108, 2249. doi: 10.1029/2002JB001920.
- Johnson L R, Nadeau R M. 2002. Asperity model of an earthquake: Static problem [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 92: 672—686.
- Kanamori H, Anderson D L. 1975. Theoretical basis for some empirical relations in seismology [J]. *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 [J]. *Geophys Res Lett*, 34(23), L23309. doi: 10.1029/2007GL031594.
- Li L, Chen Q F, Niu F, *et al.* 2009. Slip rate along the Lijiang-Ninglang Fault zone estimated from repeating earthquakes [J]. *Chin Sci Bull*, 54(3): 447—455.
- Nadeau R M, Foxall W, McEvilly T V. 1995. Clustering and periodic recurrence of microearthquakes on the San Andreas Fault at Parkfield, California [J]. *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 [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 88: 790—814.
- Nadeau R M, McEvilly T V. 1999. Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes [J]. *Science*, 285: 718—721.
- Peng Z, Ben-Zion Y. 2005. Spatio-temporal variations of crustal anisotropy from similar events in aftershocks of the 1999 *M*7.4 Izmit and *M*7.1 Duzce, Turkey, earthquake sequences [J]. *Geophys J Int*, 160: 1027—1043.
- 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.
- 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. Aftershocks of microearthquakes as probes of the mechanics of rupture [J]. *J Geophys Res*, 107, ESE3 1—16. doi: 10.1029/2001JB000496.
- Sammis C G, Rice J R. 2001. Repeating earthquakes as low-stress-drop events at a border between locked and creeping fault patches [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 91(3): 532—537.
- Schaff D P, Richards P G. 2004. Repeating seismic events in China [J]. *Science*, 303: 1176—1178.
- Vidale J E, Ellsworth W, Cole A, *et al.* 1994. Rupture variation with recurrence interval in eighteen cycles of a small earthquake [J]. *Nature*, 368: 624—626.
- Yamashita T, Knopoff L. 1987. Models of aftershock occurrence [J]. *Geophys J R Astr Soc*, 91: 13—26.

## SLIP RATES AT DEPTH ALONG THE BURIED FAULTS IN BEIJING PLAIN AREA ESTIMATED FROM REPEATING MICROEARTHQUAKES

LI Le CHEN Qi-fu

(*Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

### Abstract

Slip rates along the buried faults in Beijing plain area were investigated with the seismic waveform data between 2001 and 2006 recorded by the Beijing Digital Seismic Network. Using cross-correlation analysis of available waveforms, we identified a total of 35 doublets and 20 multiplets that show high waveform similarity. Most of these sequences are aperiodic with recurrence intervals varying from a few minutes to hundreds of days. Given the limited quantity and quality of seismic data in the study area, we have chosen a more robust approach to constrain repeated event locations. The approach incorporates both seismogram similarity by requiring cross correlation threshold and location similarity by requiring differential  $S-P$  ( $dSmP$ ) time between events pairs to be small and minor internal inconsistency in travel time picking at sub-sample precision. The composite selection approach improves the identification of repeating earthquake based on similarity in waveforms. Based on four repeating sequences, we obtained the slip rate about  $1.0 \sim 1.2 \text{ mm/a}$  at seismogenic depths of Hangzhuang-Gaoliying Fault and Nankou-Sunhe Fault, and the slip rate of  $1.5 \text{ mm/a}$  at  $9.4 \text{ km}$  of the south boundary fault of Huai'an Basin, which is consistent with geological and geodetic measurements.

**Key words** buried faults, repeating microearthquake, slip rate of fault, Beijing plain area

---

[作者简介] 李乐,女,1976年生,2008年在中国地震局地球物理研究所获博士学位,助理研究员,现主要从事重复地震与活动构造以及小震精确定位方面的研究,电话:010-88015651, E-mail: lile@seis.ac.cn。