

前兆起伏加剧与短临地震预报

秦保燕 白建华

(国家地震局兰州地震研究所)

摘 要

起伏加剧是相态突变前的一种临界现象^[1], 本文应用这一观点探讨了强地震前小震活动频次和地下流体、气体、地应力等前兆变化的起伏加剧现象, 并得到以下初步结果:

1. 临近强地震前较大范围内超过平均日活动水平的小震活动的空间分布具有有序性, 即出现穿过未来大震区的小地震活动条带, 条带的交汇区为未来大震区。

2. 强地震前的小震高频次活动日大多与外因出现时间同步, 目前发现的外因有塑塑、节气、中强以上磁暴以及大气压力下降等。这种小震的高频次活动一般出现在震前当天至一个月时间内。

3. 前兆的起伏时间和小震频次的起伏时间大致同步。它们在成因上有联系。

前 言

起伏加剧是耗散结构相态突变前出现的临界现象之一。对于大地震来说, 其复杂的震源系统、巨大的能量积累以及能量的突然释放与耗散结构十分相符。因此大地震前前兆的起伏加剧现象的出现是十分必然的。本文以测震学资料和前兆资料为基础, 探讨大地震前较大范围内小震频次起伏加剧的时空图象及其与前兆异常时间的相关性, 进而讨论大震的短临预报指标。最后对小震高频次活动与前兆突然变化之间在成因上的联系也进行了讨论。

一、短临地震预报思路

我们把耗散结构相态突变前出现的起伏加剧现象作为短临预报的主要思路。所谓涨落加剧是指所研究的系统中一些点上的相态与整个系统的平均相态的偏离。涨落的幅度愈大, 涨落的频次愈高, 说明涨落剧烈, 愈逼近大灾发生时间。在临近大震前, 震源区及其附近应力已达到很高的水平, 此时震源已趋向于不稳定(即偏离平均状态)。不稳定可以由两种形式表现出来, 一种是震源断层面上局部区域发生大量小震(这就是临近大震的前震活动); 另

一种是震源断层面上发生预位移运动。对于调整单元来说，不稳定可表现为蠕滑、弹塑性变形或流体运移的加速等。这几种不稳定过程都是为大地震的大错动作准备的。

由于震源断层面的均匀程度不同，有的大震前有前震活动，有的则很少，甚至没有。但是对于老断层重新锁住这种大震类型来说，临近大震前的预运动是存在的（根据粘滑实验）。因此，对于几乎没有前震行为的大地震来说，只要在临近大震前震源断层面上有预运动，这种运动就会影响震源区以及与之有关的相关构造发生调整运动并诱发较大范围内的小震活动，引起较短时间内小震频度的异常增高。在这种调整运动加剧的时段内，也应当期望大范围前兆的显示。对于前震比较发育的大震来说，上述这种过程也同样存在。因此，临近大震前，震源区及与它相关联的调整单元之间的协调运动以及协调运动的非平稳过程，是导致震源和其周围较大范围内小震频次和前兆加剧的主要原因。按照耗散结构理论，上述这种大大超出平均活动水平的震兆现象说明，震源系统已处于非线性阶段，它的不可逆性愈加增强了。此时，震源系统内运动的有序性大大增强，其有序性之源就是震源断层面上局部地区的能量预释放。因此，从原则上说，有序性与大震发生的位置有一定关系。所以，通过起伏加剧时段小震的空间分布可以得到确定大震位置的某些线索。

对于大震的短临时间预报，我们仍然以调制模式作为理论依据〔2〕，即由于临近大地震前震源系统已处于不稳定状态，应力水平较高，因而外因对震源系统的非平稳状态下的调制作用加强，从而使小震频次和前兆的起伏加剧时间与外因时间同步，由此可对大震发生的日期作出短临预测。但小震频次和前兆的起伏往往有多起，因此大震的短临时间预报属于跨越式短时段预报，不是唯一时段的临震预报。本文以7级和7级以上的大震为例对大震的短临预报进行探讨。

二、大震前震源系统起伏加剧与短临预报震例总结

在这里我们主要根据测震学资料对海城、唐山和松潘三次大震进行总结，并将某些结果与前兆资料作初步对比。

1. 1975年2月4日海城7.3级地震

这次地震前，在海城大震区有大量的前震活动，它是海城大震的主要预报依据。但是前震活动与主震发生时间相当接近（仅2~3天），这对采取地震对策措施时间太紧迫。由于临近地震前震源过程的非平稳性，大震前震源系统的某些异常可能出现多次起伏，因此这种起伏加剧的短临预报指标往往在较早时间就已经出现。为此对海城地震我们从1975年元月开始统计，统计区范围为 $34^{\circ}\sim 45^{\circ}$ （北纬）， $110^{\circ}\sim 122^{\circ}$ （东经）。这一统计范围内小震频度随时间的变化如图1所示。从图1可以看出以下几点：

（1）起伏摆动幅度随时间进程增长

由图可以看到，在元月上旬地震频次的起伏摆动幅度仅为两次，而在元月中旬以后，起伏摆动幅度可达到6次。这说明起伏摆动幅度随时间进程的加剧。

（2）起伏高度随时间进程增高

在元月上旬，起伏高度仅为6次左右，而在中旬后，起伏高度达到8次，这说明震源区周围应力水平的提高。

（3）出现了高于平均水平的高频次小震活动

海城大震前于元月9日、21日和2月4日在统计区内出现小震频次高峰异常，它们分别达到10次、15次和287次，大大超出平均活动水平。元月16日、18日、23日和25日还有小震频次次高峰异常，其频次分别为8次、10次、8次和8次，基本上超出平均活动水平。我们认为这种超出正常水平的小震活动是震源系统内大的起伏，是属于震源系统内非线性所引起的现象。此时小震的时空活动将不是随机的、独立的、互不相关的，而是在时空上有联系的。图2表示了元月9日、21日和2月4日三天的小震活动的空间分布。由图2可以看出，这三个高峰频次的小震位置沿两个条带分布，海城大震震中位于两个小震条带的交汇区附近。这说明远离平均状态的小震位置在空间上具有有序性。这种有序性与大震位置有关。

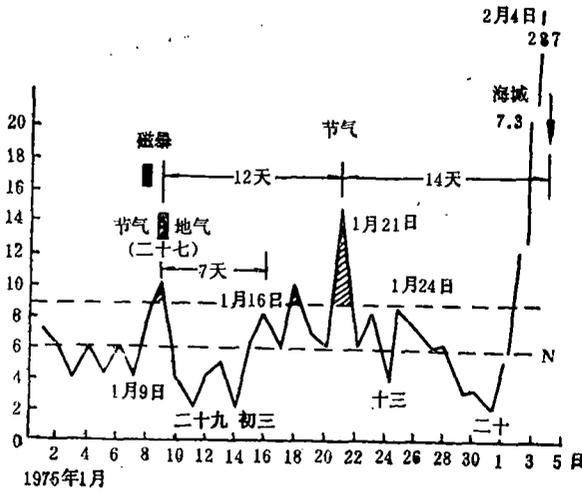


图1 1975年海城大震前小震频度随时间的变化
Fig. 1 The change of small earthquake frequency with time before the Haicheng earthquake in 1975

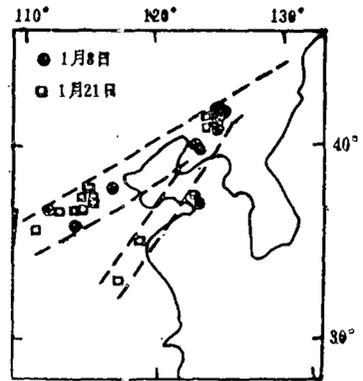


图2 1975年海城大震前高频日小震活动分布
Fig. 2 Distribution of the high frequency activity dates of small earthquakes before the Haicheng earthquake in 1975

(4) 起伏频次增高

在1975年元月份的前半个月，仅有元月8—9日一次小震频次高峰，持时2天。而在后半个月，小震高频次活动达5次，形成起伏群，其总的持时达9天。这说明随着逼近海城大震发震日期，震源系统各点恢复到旧相（平均态）的能力减小了。

(5) 小震频次随时间的变化与某些前兆随时间的变化具有准同步特征

按照前面所论述的观点，在临近大震前，与震源不稳定有关的区域性小震活动加剧的同时，也应有相应的前兆起伏加剧显示。事实究竟如何呢？将小震高频次活动时间与大范围前兆出现的异常时间对比后可以发现，丹东的水氡、海城震中区及其附近的地气、丰满的水管倾斜等前兆突变异常⁽⁸⁾时间大多与小震高频次或次高频次日期同步。这些准同步日期是元月9日、元月15日~16日、元月18日~20日、2月1日至4日（指大震前）。其前兆异常图如图3所示。

2. 1976年7月28日唐山7.8级地震

在这次大震前，震中区没有观测到小震活动。唐山大震预报未能成功与前震指标没有出现有很大关系。然而我们把注意力从震中区扩大到震源的外围，这时我们发现，其震源区的应力水平和不稳定性可以从外围小震活动的起伏加剧中有所觉察。为此，我们取北纬35°~

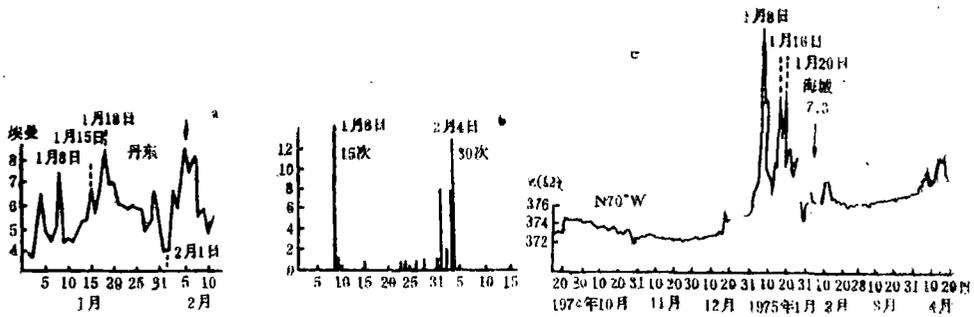


图3 水氡、地气、地应力前兆异常的同步性

a. 水氡日均值(丹东) b. 地气异常频次随时间变化 c. 海城大震前唐山陡河台地应力(阻抗)日均值曲线(Δ=390公里)

Fig. 8 Synchronization of premonitory anomaly of radon, underground gas and earth stress

41°, 东经110°~122°作统计范围, 取震前近1.5个月, 即从1976年6月15日到1976年7月28日唐山大震发生前作为统计时段, 我们得到小震频次随时间的变化图(图4)以及小震高频次日的地震活动图象(图5)。

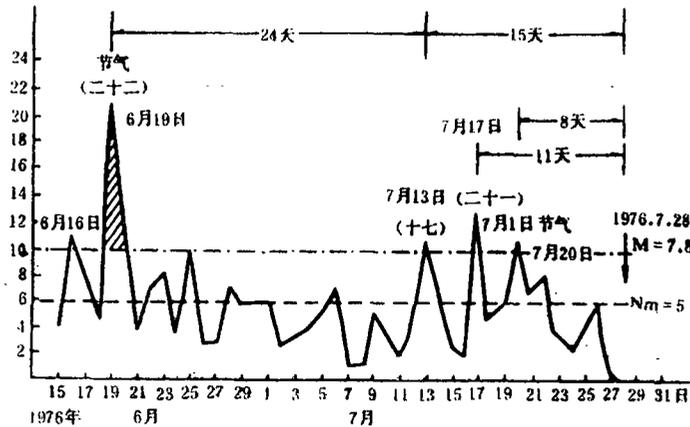


图4 唐山大震前大区域小震频度随时间的变化

Fig. 4 The change of small earthquake frequency with time in large region before the Tangshan large earthquake

由图4可以看出, 小震频次高峰日期为6月16日、19日、25日、7月13日、17日和20日, 其频次峰值均等于或超过10次。在这几个高频次活动日中, 我们选取了6月19日、7月13日、17日和20日的小震作震中分布图, 得到了图5。由图5可以看出, 在唐山大震前起伏加剧期内的的小震活动具有有序的空间图象, 即小震活动呈现两个条带, 唐山大震就位于其交汇处附近。值得指出的是, 唐山大震前临震突跳的异常点分布也呈条带状, 且与高频次小震活动得到的有序条带相一致, 前兆突跳的条带分布如图6所示。

根据文献[4]列举的临震前兆资料, 唐山大震前水氡、地电阻率、油井动态、地下水、地应力等前兆突跳日期大多与小震高频次活动日期相近, 特别是7月20日和20日以后出现的前兆异常频次较高。为了节省篇幅, 这里以表1给出有关结果。前兆变化图件可直接参考文献[4]。

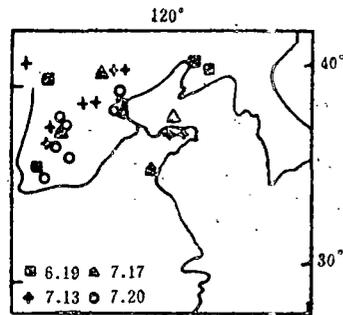
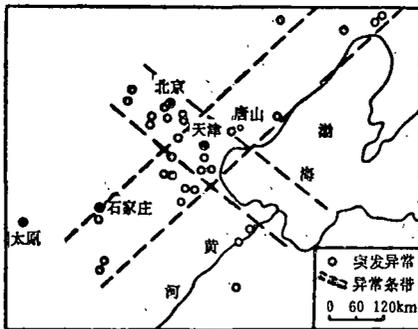


图5 唐山大震前高频次活动日小震的空间分布

图6 唐山大震前前兆突跳的空间分布

Fig. 5 The space distribution of the high frequency activity dates of small earthquake before the Tangshan large earthquake.

Fig. 6 The space distribution of sudden change of premonitory impending the Tangshan large earthquake

表1 唐山大震前小震高频次活动日期与前兆突跳日期对比表(4)

前兆名 前兆突跳日期 高频次小震日	水氡	地电阻率	油井动态	地下水汽	地应力	宏观
1976年6月16日		6月中旬(马家沟)	6月中旬(旺11井)			
6月19日		6月20日左右(昌黎)	6月下旬(旺11井)			
6月25日					7月4日(昌黎)	
1976年7月13日	7月14日(矾山) 7月15日(廊坊)	7月中旬(昌黎)	7月10日前后旺11井 7月中旬(滨278、285井, 昌黎)	7月13日(丰南)	7月13日(永年) 7月16日(沈阳)	
17日	7月20日(武清)		7月17日(晋县小牛庄)			
20日	21日(清江) 21日(怀来) 22日(张道口) 23日(营庄) 24日(唐山) 26日(曲阜) 27日(曲阜)	7月22日(西集) 24日(小汤山) 25日(徐庄子) 26日(马家沟)	25-26日	7月23日(拍农一场) 天津袁口震庄)	7月20日(锦州) 22日(大连)	7月下旬
				23-25日(昌黎等) 24日(唐山) 25-26日(杨官林) 27日(丰润)	23日(长治) 26日(安丘)	

由表1可以看出,唐山大震前前兆突跳异常主要与7月中旬以后出现的小震高频活动对应较好。特别是7月20日以后前兆异常种类、频次、异常幅度均比较高,这说明震前10天内前兆起伏加剧更为明显,并预示着大震即将发生。

3. 1976年8月16日松潘7.2级地震

1976年松潘地震前,特别是临近大震发生前,震中区未观测到小震活动。对于这种缺少前震的大震,其短临预报的难度是相当大的。为了了解松潘大震前大范围小震活动情况,我们选取了由康定到武威(30°N~38°N),炉霍至海原(100°~106°E)这一较大范围进行统

计。取这样的统计范围主要是考虑松潘地震位于南北地震带以及青藏高原边缘这一特定位置。根据统计，松潘地震前小震频次随时间的变化如图7所示。高频次日的小震活动空间分布如图8所示。由图7可以看到，其高频次日为6月27日、7月13日和8月15日。由图8可以看到，松潘大震前，在震中区附近呈现两个条带，其中北东东向的条带比较清晰。此外，在1927年古浪大震区以及康定南还有两个地震活动相对集中的地区。这两个地区可考虑为松潘地震前小震的相关活动区。相关的原因可能是在构造上或深部有通道，另外可能是这两个区是具有较高应力水平的调整区（近代曾发生大地震，介质比较弱）。由图8中可以看出，I、II小震活动区以及松潘大震区位于同一个构造带上（青藏高原东缘和东北缘），因而松潘大震与I、II区的小震活动具有通道联系。

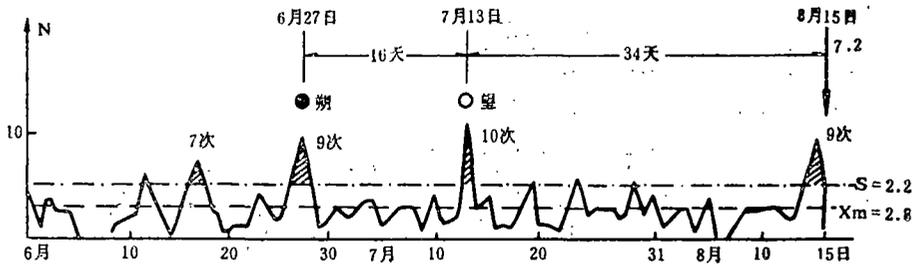


图7 1976年8月16日松潘大震前大范围小震频次随时间变化 ($M \geq 1.0$)

Fig. 7 The change of small earthquake frequency with time in large region before the Songpan earthquake on Aug. 16, 1976

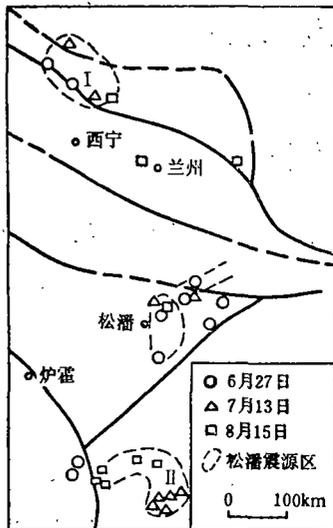


图8 1976年三次高频次地震活动分布图

Fig. 8 Distribution of three high frequency activities of earthquakes in 1976

在松潘大震前水氡异常比较明显，此外还有水温、地磁异常等。图9为部分前兆异常图。〔5〕。由图可见，7月13日平武台水氡出现负突跳，始咱台出现正突跳（图9 a、b），理塘县毛垭泉水温突然升温（图9 c），这一突跳异常同步日与高频次小震活动日一致。此外，6月27日前后，除毛垭泉水温有一明显异常外，成都基准台无定向磁力仪均方根曲线于6月27日出现明显异常，磁偏角于7月13日出现异常（图略）〔6〕。因此6月27日的前兆异常也与高频次小震活动日期相对应。但平武台水氡的7月29日和8月9日的突跳异常以及

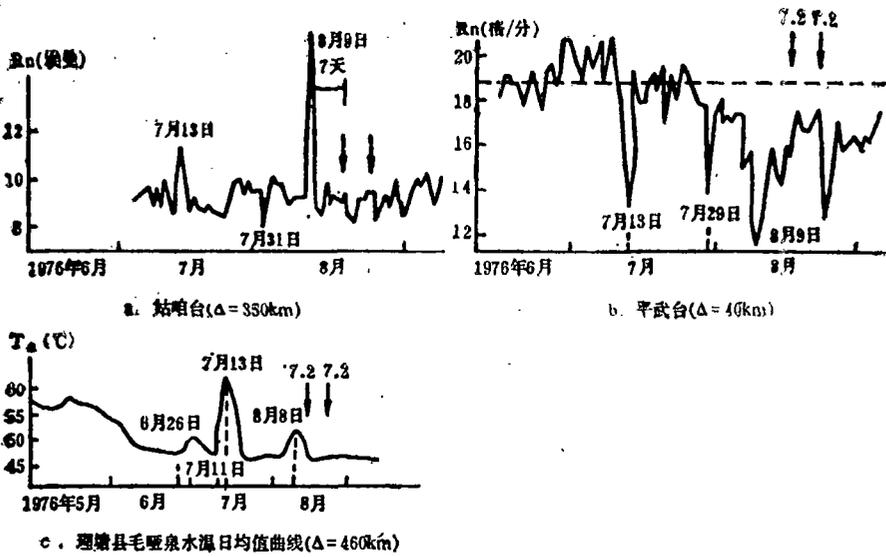


图9 松潘大震前部分前兆随时间的变化
 Fig. 9 The change of partial precursors with time before the Songpan large earthquake

甘孜台、姑咱台 8 月 9 日的水氧突跳异常并不与高频次小震活动日期相一致。但应当指出，这二个日期与外因日期一致，即 7 月 29 日为朔日，8 月 9 日有中烈磁暴。

三、起伏加剧短临预报指标讨论

1. 起伏加剧判据

起伏加剧可以用起伏偏离度和起伏频次这两个指标衡量。

(1) 起伏偏离度

由于地震之间和各前兆观测测量之间的差异较大，因此，为提高其可比性，定义偏离度 η 为

$$\eta = \frac{\sigma_s}{S} ; \tag{1}$$

$$\sigma_s = N_i - N_m . \tag{2}$$

式中 N_i 为某一时间段的频次或观测前兆幅值， N_m 为 n 次观测值的平均值， S 为观测值的标准差。公式中各参数的量取如图 10 所示。在这里我们规定超过一倍均方根（即 S ）为起伏加剧异常指标。在实际计算 S 时，最好取无异常段求得。本文计算中由于统计时段较短，观测值中已包含有异常，故 S 值偏大。

根据 (1) 式，我们计算了前述三次强震前小震高频次活动的偏离度 η ，其结果如表 2 所示。

(2) 起伏频次

震源系统小震涨落的频次是衡量应力水平高低的一种指标。前兆的涨落频次也类似。根据表 2 和图 1、4、7 可以看出，起伏加剧大致可分为三个阶段：第一阶段出现在震

前1~1.5月，其前兆起伏一般为单峰特征；第二阶段在震前半月~1月，起伏呈现多峰特征。这一现象说明起伏加剧比前一阶段明显；第三阶段是临震阶段，小震起伏频次有单峰也有无起伏特征，但前兆表现十分剧烈，往往呈现多种前兆手段，多峰突跳。为了清楚起见，我们画出了大震前短临起伏加剧三个阶段的模式图（图11）。在第三阶段，由于更接近临震，震源更趋向于不稳定，因而外因调制前兆的能力加强。

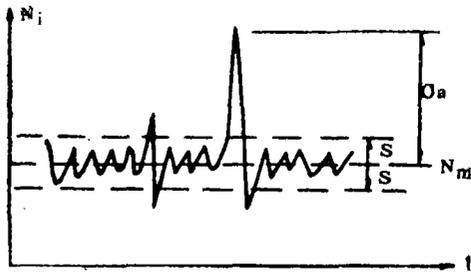


图10 起伏偏离度

Fig.10 Fluctuation deviation

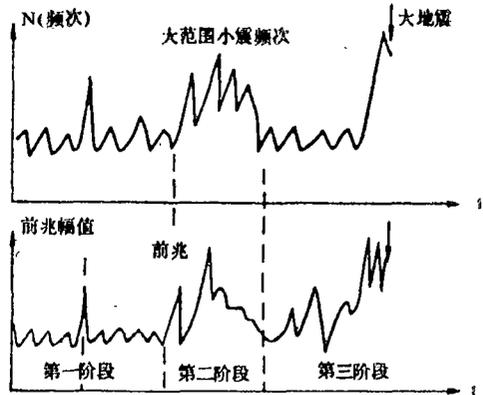


图11 大震前短临异常起伏加剧三阶段模式图

Fig.11 The model of three stages of the anomaly fluctuation aggravation impending large earthquake

表2 地震频次偏离度

海城地震		唐山地震		松潘地震	
异常时间	偏离度 η	异常时间	偏离度 η	异常时间	偏离度 η
1975年1月9日	1.33	1976年6月19日	3.8	1976年6月27日	3
1月18日	1.33	7月13日	1.25	7月13日	2.4
1月21日	2.33	7月17日	1.75	8月15日	3
2月4日	94	7月20日	1.25		

2. 小震频次起伏加剧的范围与地震震级的关系

在讨论小震频次时，我们有意用较大的范围来进行统计。这样，在前面高频次日的地震活动图像是大震前实际的空间展布范围。为清楚起见，我们将三次强地震的范围和震级列于表3中。

表3 海城、唐山和松潘地震前高频次小震活动日空间展布范围L

地震日期	震中	M	L (公里)
1975年2月4日	海城	7.3	1300
1976年7月28日	唐山	7.8	1000
1976年8月16日	松潘	7.2	1080

从表3可以看出，大震前小震活动的空间范围基本上与震级无关。

3. 未来的地震位置一般位于两个小震带的交汇区附近，因此，根据高频日小震活动的空间分布大体可圈定地震危险区。

4. 小震高频次活动日与地震发生时间

根据前面的震例, 对大震发生时间预报仍然是比较困难的, 主要原因是震源地方的应力水平很高, 它可以不受外因的调制而引起震源过程。这种过程因为无规律可循人们很难掌握它。但是外因调制震源过程的作用仍不能忽视。表4为小震高频活动日与外因以及大震发震时间统计表。从表3的统计结果来看, 在高频次小震活动日有外因起调制作用的占 $6/9 = 0.67$ 。其发震日期符合倍九日的(8~10天算符合)有4次, 符合倍七日的有1次, 占总次数的56%。此外, 根据本文小震高频次活动与前兆的对比, 在紧邻地震之前大多仅呈现前兆变化。据此, 可将第三次起伏前兆突跳日期作为更接近于大震日期的预报。

表4 高频次小震日、外因和大震发生时间

地震日期	震中	M	外因	小震高频日时间	高频日与主震日期差
1975年2月4日	海城	7.3	1月8日磁暴 1月20日低气压 2月4日低气压	1月9日 1月21日(大寒21日) 2月4日(立春4日)	26天 14天 0天
1976年7月28日	唐山	7.8	7月13日望日 6月19日二十二夏至 7月17日二十一 7月20日二十一大暑	7月13日 6月19日(21日夏至) 7月17日 7月20日(23日大暑)	15天 39天 11天 8天
1976年8月16日	松潘	7.2	6月27日朔日 7月13日望日	6月27日 7月13日	50天 34天

四、有关机理讨论

1. 高频次小震活动与前兆突变时间准同步性机理的讨论

本文在进行大震前高频次小震活动与前兆突变时间的对比时发现, 有的地震前, 先有高频小震活动, 随后发现地气前兆异常, 而有的地震前是先有地气前兆异常, 随后出现小震频次的高峰异常; 但其滞后的时间不长, 一般为1~2天。文献[7]在讨论“唐山地震前的某些地震前兆”时曾指出: 地下流体是地壳中最容易运动的物质, 在震源断层盘前进的方向上地壳内如有流体逸出, 则有利于断层盘向流体逸出地面前进, 从而促进地震发生。这一观点后来由荣代潞所做的模拟实验所证实。在这里, 我们将这种观点引用于临近大震前更大的范围。因为临近大震前震源区的小震活动以及预运动均可造成较大范围内与其相关的断层发生运动; 这种运动可导致较大范围的小震活动, 而小震活动又可激发地下流体和气体逸出异常, 这时前兆就迟后于小震活动。当大震前构造的调整运动首先造成地下流体和气体逸出异常时, 由于它提供了让位, 因而有利于小震的发生, 并造成大范围的小震活动异常。此时小震活动将滞后于地下流体或气体的前兆。所以小震与地下流体和气体异常之间存在着互为因果的关系。

2. 临近大震前小震活动空间有序性讨论

贝纳特实验告诉我们, 有序性图案与系统的边界条件以及能量的供给(如速度)有关, 因此在不同的非线性阶段由于其应变速度不同所以有序性的图像是不同的。从本文介绍的三次大震来看, 其临近大地震前的小震高频次日所反映的条带走向、位置与中期尺度的中、小地震的条带分布是有差异的。这里我们仅以唐山大震为例对这一问题进行讨论。

根据文献〔8〕的研究，唐山震源系统大致在1970年丰南地震后进入了非线性阶段。此后该区的中小地震曾出现两个条带，一个条带为近东西向，该条带与地质上的阴山构造相一致。另一个条带为北北东向，这与华北地区的北北东向的优势构造方向相一致。上述这两个构造可以作为唐山大震孕震至后期的边界条件之一。在区域应力的作用下，这两个构造将产生剪切位移，并派生出北东东和北西方向的两个最大剪切带，这就是临近唐山大震前小震空间活动有序化的通道。

值得指出的是，上述三次大震其区域构造力源方向大体一致，即为近东西向，此外在临近地震之前均出现了北东东方向的小震条带，而这一方向的条带有可能是岩石圈下层在东西向力源作用下剪切滑移带派生的地壳浅部剪切带，因而它对大震的调制触发作用更为重要。

综上所述，小震异常活动和前兆在空间上的有序性是必须有通道联系的。其通道可能就是深部或浅部的剪切带。而大震前小震的调整活动也将受到深、浅剪切带的控制。

(本文1989年4月15日收到)

结 束 语

本文提出的短临预报指标不仅适用于前震比较发育的大震区，而且也适用于前震不发育的大震区。由于大震前前兆起伏有多次，因此大震的时间预报完全排除虚报是不可能的。

短临预报是难度很大的预报目标。鉴于地震的复杂性，本文提出的预报思路和方法如果能对一部分大震的短临预报起到有益的作用作者已是感到莫大的欣慰了。此外，本文提出的方法要求预报部门及时掌握大范围的震情时空分布，并进行追踪式的预报。因此，信息的快速传递将是实现短临预报的关键。

参 考 文 献

- 〔1〕郭增建、秦保燕，从统计物理学角度讨论大震预报，国际地震动态，No. 8，1986.
- 〔2〕郭增建、秦保燕，论短临预报的调制模式，西北地震学报，Vol. 2, No. 1，1980.
- 〔3〕朱凤鸣、吴戈等，一九七五年海城地震，地震出版社，1982.
- 〔4〕梅世蓉等，一九七六年唐山大地震，地震出版社，1982.
- 〔5〕国家地震局分析预报中心第一研究室，中国地震前兆资料图集（1962—1980），地震出版社，1984.
- 〔6〕成都基准台，松潘地震的地磁异常，地震战线，No. 8，1978.
- 〔7〕郭增建、秦保燕、庄进，唐山地震前某些地震前兆，西北地震学报，Vol. 6，No. 3，1984.
- 〔8〕秦保燕，大震前复杂震源系统的非线性阶段和大震预报（一），西北地震学报，Vol. 3，No. 4，1986.

PREMONITORY FLUCTUATION AGGRAVATION AND IMPENDING EARTHQUAKE PREDICTION

Qin Baoyan, Bai Jianhua

(*The Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB*)

Abstract

Fluctuation aggravation is a kind of critical phenomenon before suddenly phase change. In this paper we discuss premonitory fluctuation aggravation before strong earthquake at this point, such as small earthquake frequency, underground fluid, gas and earth stress and so on. The preliminary conclusions are as follows:

1. Before strong earthquake, the space distribution of small earthquakes which exceed average day active level in a large area is of the orderliness --the active belts of small earthquakes pass through the coming strong earthquake area. The intersecting area of two belts is the site of coming strong earthquake.

2. Before strong earthquake, most of the high frequency day of small earthquakes synchronize the time of the external causes, the external causes that are found at present include syzygy, solar term, magnetic storm exceeding middle level, and atmosphere pressure fall and so on. This kind of high frequency activity of small earthquakes usually appears a month or a day before the coming strong earthquakes.

3. The time of the premonitory fluctuation and the time of small earthquake frequency fluctuation are approximately synchronization, there are relations between them in the cause of formation.

Impending prediction indexes of earthquake as stated here are not only applicable to the many foreshock area, but also to few foreshock area. Because there are many times of premonitory fluctuation before strong earthquake, it is not possible to completely eliminate false for the time prediction of the strong earthquake.