

张北 6.2 级地震前中短期倾斜形变的 阶段性及其实验解释^{*}

牛安福

(中国武汉 430071 中国地震局地震研究所)

摘要 利用倾斜观测、借助异常定量分析方法, 讨论了张北地震前形变的线性与非线性异常特性, 并以此归纳了地震的演化过程中倾斜形变的阶段性特征: ① 燕山北部块体上的 EW 向倾斜在震前 1a 时间尺度内保持相对静止, 近震源区台站倾斜矢量在某点附近出现反复, 临震前出现突跳; ② 同一测点处两个方向倾斜的发散水平在震前 2a 内出现近似同步的运动特征, 且有减弱趋势(减熵过程); ③ 同一块体不同测点处的异常强度 AF 值在震前 3 a 间至少均出现两次较显著的高值异常. 利用岩石破裂模拟实验结果, 对倾斜变形或其它前兆手段震前出现相对平静(减熵)、倾斜形变矢量打结、强震前两次形变异常强度 AF 高值, 甚至地震成组现象等进行了较合理的解释.

关键词 倾斜形变 阶段性 破裂过程 非线性

引言

“变形—破裂—地震”的 3 个阶段是密不可分的, 但也有本质区别. 地震的发生是极限变形(破裂)后发生快速运动的结果, 是瞬间发生的过程(Лукк, Юнга, 1988). 对构造地震而言, 孕育是有较长过程的. 各种前兆观测综合分析表明, 震前 3 a 孕震区域上形变和其它前兆异常的频次即开始出现增强趋势. 因地球中不同尺度的变形是永恒的, 通过变形观测如何检测潜在的地震信息是地震预测的根本问题之一, 也是解决地震预测问题的关键.

不少学者曾对此进行过不同程度的探索(吴翼麟, 李旭东, 1991; 吴翼麟, 周克昌, 1993; 牛安福等, 1995), 发现了一些异常特征, 如倾斜矢量“打结”、震前熵值下降和变形的区域性异常等, 从而为地震前兆识别提供了一定的参考依据. 但这些研究基本上未对异常现象的阶段性及其非线性、复杂性进行解释.

地震过程伴随的前兆特征是复杂的, 不同测点、阶段和观测手段, 前兆的异常形式是不尽相同的. 面对过程的复杂性, 笔者希望利用最基本的数学物理参数, 讨论异常的阶段性特征, 并从破裂模拟实验结果给予一定的解析.

* 中国地震局重点项目(95-04-05)和地震科学联合基金(197066)资助课题.
1998-04-29 收到初稿, 1998-09-15 收到修改稿, 1998-09-23 决定采用.

1 张北地震前倾斜形变异常分布的不均匀性与阶段性特征

1.1 张北地震发生的构造环境

张北地震发生在阴山带、燕山断陷带和山西断陷带交叉部位的北部。燕山断陷带整体上呈 EW 向, 有若干断裂条带组成。震前, 在沿燕山断裂带附近分布有较多的倾斜形变异常, 但由于该区台站多数呈线性分布, 对震前危险区定位带来很大的不方便。图 1 展示了华北北部的构造背景和台站分布。由图看出, 张家口、怀来、承德、西拨子位于同一块体上, 即燕北块体。蔚县观测点位于燕山断陷带内, 张北地震西部的呼和浩特观测点似乎也在同一块体上, 但由于山西断陷带的作用, 该台站不完全具有燕山断块的运动特征。

1.2 地震前倾斜形变的短临异常特征

由原始倾斜观测可以较直观地反映地壳运动的信息, 且是固体潮观测中的主要成分。由其变化可以发现地震过程中的阶段性转变标志。图 2 是 EW 和 NS 向倾斜的动态变化。呼和浩特和承德台倾斜的形态幅度与近震源区的张家口、怀来和西拨子有较大的差别, 主要表现为变化幅度大、形态不稳定。承德台倾斜在 t_1 时刻后, 改变以往的下降趋势而趋于相对平稳。张家口、怀来和西拨子台在 t_1 时刻之前与 t_2 时刻之前的变化也有较大的不同, 主要表现为震前 EW 向倾斜出现了相对平静现象(图 2)。

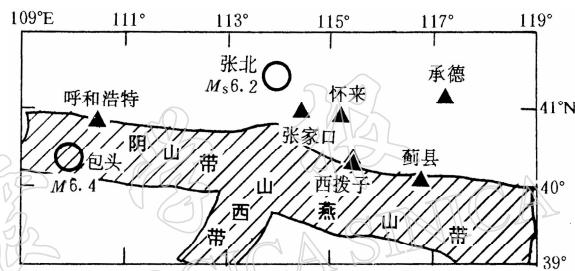


图 1 张北震区的构造条件与观测点分布。阴影区为断陷带, 空圆圈代表地震, 黑三角代表倾斜台站

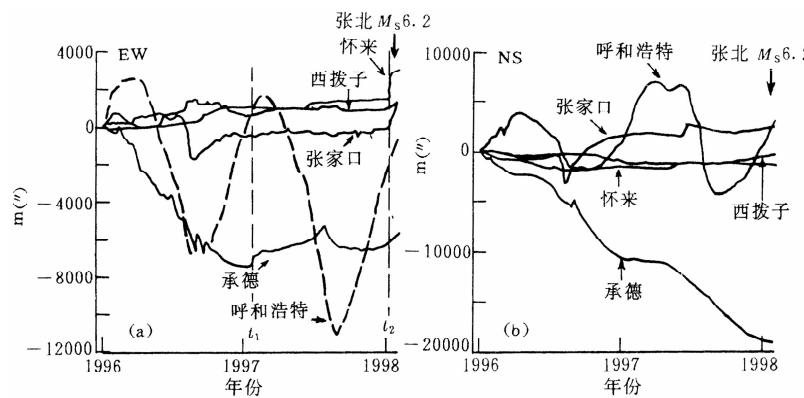


图 2 几个台站的倾斜形变观测曲线。(a)EW 向; (b)NS 向

倾斜矢量临震前出现“打结”现象在多次地震前被证实过(吴翼麟, 李旭东, 1991; 吴翼麟, 周克昌, 1993)。“打结”的涵义在于两个方向倾斜出现相对静止, 或在较小的变化范围内反复, 呈“被吸引”状, 张北地震前同样也出现这种现象。图 3 展示了近震源区倾斜矢量的“打结”过程。

张北地震前倾斜变形的整体特征也能证实观测值自身的含义。本研究提供的数据，证实了同一块体上的倾斜运动特征具有一定的关联性，如图 2 中张家口、怀来、承德、西拨子台的倾斜，震前具有相似的动态(趋向平稳)。该图同样也表明，震前近震源区变形的幅度相对外围要小得多，这一定程度上可解释为潜在的“坚固体”(梅世蓉，1996)。数据表明，在平静背景下出现的突跳是转入短临阶段的标志。

临震前兆异常特征在近震源区表现得较为突出。如张家口和怀来 EW 向倾斜，震前 10 天内出现显著的加速变化。

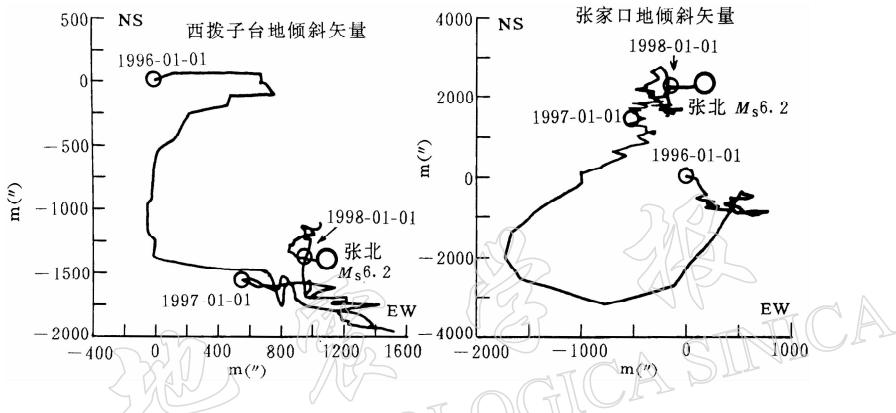


图 3 倾斜矢量图. (a) 西拨子台; (b) 张家口台

1.3 地震前倾斜形变的中短期非线性异常特征

1.3.1 形变的非线性发散特征

地震孕育后期，孕震系统表现为较高水平的非线性。线性型异常特征(如变形的均值变化，见图 2)仅在近震源区域上有一定的相关性，远离震源区的变形往往与近震源区变形在幅度和形态上有较大差别。而非线性变形特征与地震有着较为密切的关系，且影响区域较大。目前，在台网密度普遍不高的情况下，挖掘变形中的非线性信息显得尤为重要。

过程的统计量——方差是系统二次非线性的表征量，且与系统熵有密切关系。对平稳过程而言，系统熵可以用某时间段内的方差 σ 来简单描述。理论上：系统熵 $H = a + b \cdot \lg(\sigma)$ ， $b > 0$ (牛安福等，1995)。对任一实际过程，则通过构造新的、具有准平稳性的物理参数，来描述过程的非线性特征。如实际观测的倾斜反映了相对某一固定时刻倾斜的累积量，这是一复杂的过程，而一阶差分是前后两个时刻的变化量，具有平稳特性。

由图 4 可见，震前 2 a 时间尺度上，燕北块体无论 EW 向还是 NS 向，倾斜观测的发散水平基本都出现了近于同步的高值和下降趋势。

在边界或其它块体的台站附近，相对较活跃的变化背景，倾斜形变的发散水平与近震源区的关联性仍不是很清楚。为寻找在震前可能存在的区域性异常特征，笔者依据观测的两个统计特征(均值与方差)，对每一测点的两个方向倾斜进行了综合的异常强度分析。

1.3.2 倾斜形变非线性特征的定量检验

破裂实验模拟的方法，早期使用的是破裂综合预报因子方法(Бадари *et al.*., 1988)。该方法可以检测样本中不同部分破裂的先后，但数值本身的意义不很清楚。在模拟分析的基础上，破裂前兆的动态场综合分析方法(Gitis *et al.*., 1995)得到了多方面的重视，特别是给

出了异常判别准则. 但动态场综合处理方法应用起来也面临一些问题, 如判别准则很大程度上依赖于合成维数. 鉴于此, 笔者改进了动态综合分析方法, 在 Fisher 检验理论的基础上提出了异常强度的概念, 对多种复杂的过程依据给定的信度(95%), 提供了统一的异常判别准则——异常强度 AF 值判别法(牛安福等, 1998a). 它综合分析了系统过程的线性与非线性特征, 为克服不同动态背景对区域性异常特征判别结果的影响, 提供了定量分析依据.

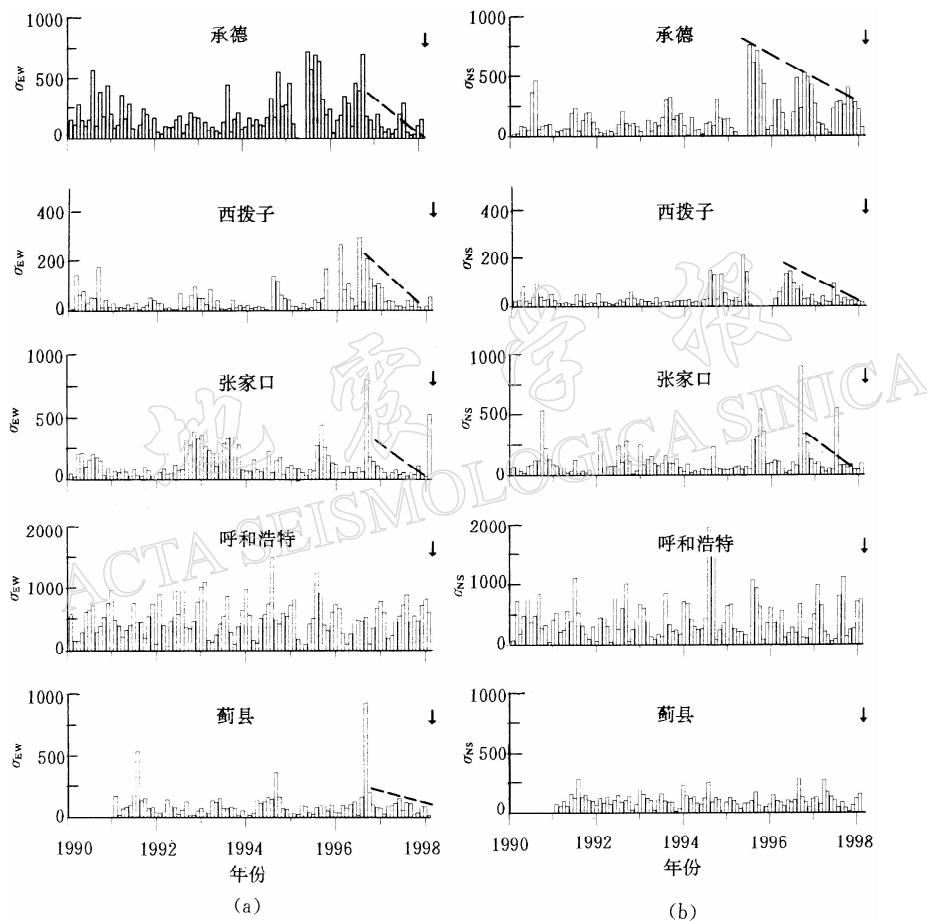


图 4 各测点倾斜形变的方差值 σ . (a) EW 向; (b) NS 向

比较图 5 各曲线可知, 在震前 3 a~1 a, 华北北部的异常强度和其异常频次明显高于往年任何时候, 各观测点至少出现 2 次较显著的异常时间段, 在一些台站上也可发现强度较大的同步异常; 地震前 1 a, 研究区域上测点的异常强度整体上趋向减弱; 地震前 0.5 a, 在近震源区出现相对较弱($1 < AF < 2$)的近于同步的异常; 临震前, 近震源区台站出现异常强度高值.

值得说明的是, 呼和浩特和张家口测点倾斜的异常强度特征有一定的相关性, 特别是在 1996 年 5 月包头 $M_s = 6.4$ 地震前, 呼和浩特倾斜变形通过异常强度可以较明显地反映出震前有两次异常强度高值, 张北 $M_s = 6.2$ 地震前也有类似的反映, 尽管由倾斜变化动态和发散水平很难发现这一点(图 2, 4). 另外, 蓟县台在张北地震前 1.5 a, 也可发现两次

较为主要的异常.

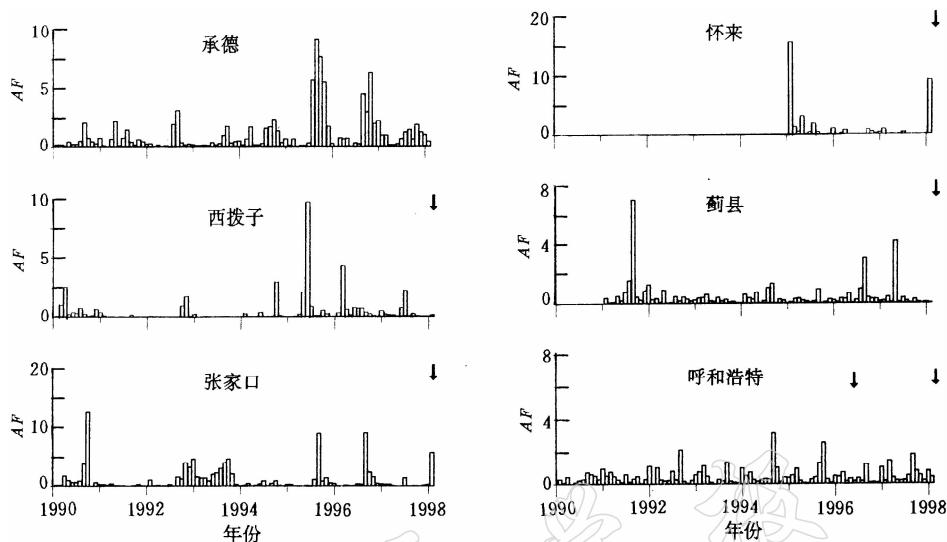


图 5 各测点倾斜变化的异常强度 AF 值(纵坐标无量纲或倍数)

2 实验室岩石破裂模拟方法对张北地震前定点形变异常特征解释

在实验室岩石破裂模拟的基础上, Садовский 等(1987)和 Соболев(1993)提出并完善了地壳介质的离散等级结构模型, 形成了非线性地球物理观点. 该观点认为地球介质是由各种规模的块体组成, 尺度大小服从几何定律. 因地壳介质的离散等级结构模型与实际模型更为接近, 我国学者梅世蓉(1996)在此基础上提出了地震过程的“坚固体”模式. 岩石破裂模拟结果反映了介质的离散非线性特征, 可依据实际资料对地震过程和孕震中变形的阶段性特征进行解释, 并一定程度上可给出“坚固体”模式和“地震成组”模式成立的一些证据.

图 6 展示了实验室岩体破裂的全过程. 由此发现, 大破裂发生前, 能检测出两次较为显著的阶段性转换标志, 即表明完整的破裂过程要经过一级结构分化(IV)和二级结构分化(VI), 这两个阶段有较显著的变形过程发生. 两级结构分化之间(V), 尽管有声发射发生, 但相比之下是缓慢的. 在临近大破裂之前, 声发射是不稳定的, 最后大尺度的破裂出现在声发射相对平静状态下.

岩石破裂伴随的声发射频率反映了岩石内部的自适应特性, 在完整岩石受力达到一定程度时, 岩石会产生一次较小尺度的破裂(类似于前震), 并出现暂时的稳定(III), 进一步又将激发一次较主要的变形(强震). 大破裂(强震)发生后, 若观测到的声发射或小震频次十分稀少(如阶段 V 初期), 则相临近区域还将有发生大破裂(二次强震)的可能.

若将图 1 中的区域作为完整的岩石样本, 包头地震(1996 年 5 月, $M_s = 6.4$)为一级较主要的破裂变形(类似于实验结果的阶段 IV), 该次地震前 1 a 左右, 地震周围曾发生过 $M_s > 3.5$ 的小震活动多次(III). 但包头地震后(1 a)小震活动基本未出现, 而在张北和北京周围开始有小震活动, 张北 $M_s = 6.2$ 地震也就是发生在这样的背景下(IV).

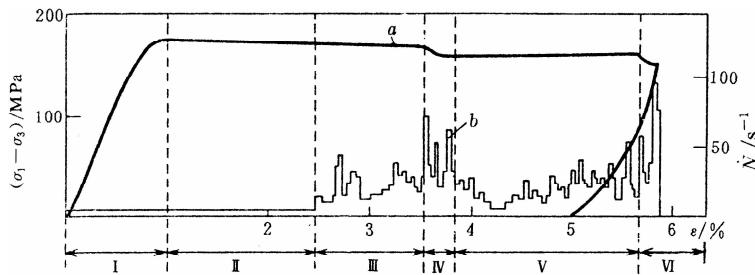


图 6 大理石破裂过程中变形(a)与声发射频率(b)的时间过程
(Асатрян *et al.*, 1993). \dot{N} 为声发射速率, 横坐标 ϵ 为相对变形

包头和张北地震前, 与其相近的呼和浩特形变观测台, 通过非线性定量分析可检测出两次较清晰的异常强度高值, 这一特征与其它台站是相似的(图 5). 但通过观测值的动态和发散水平则不易发现这一区域性的特征(图 2, 图 4).

包头地震后, 在张北地区这一级块体周围, 也先后出现两次较主要的阶段性变形转换标志, 即异常强度高值. 异常标志出现后, 该区也先后发生了强弱不等的地震: 一是 1997 年 5 月 25 日张家口 4.2 级地震; 二是 1998 年 1 月 10 日张北 6.2 级强震.

从变形的角度分析, 一级结构分化既产生显著变形(IV), 显著变形表现为异常强度出现高值, 之后, 所形成的若干个小块体在外部应力环境作用下是不稳定的, 每一小块体同样面临进一步地结构分化. 因尺度变小, 多呈无序破裂, 释放的能量多数情况下不能集中用于变形, 因而变形是不显著的(V), 且是不稳定的. 随着小破裂频次的增加, 又将会诱发大的破裂变形, 即震前在震源体附近也可能观测到显著的变形异常(VI). 这些阶段性特征在丽江地震前也出现过(牛安福等, 1998b).

因此, 倾斜变形或其它前兆手段在震前出现相对平静(减熵)、倾斜变形矢量打结、两次形变异常强度 AF 高值, 甚至地震成组现象均应是较为合理的.

3 结论

从张北地震前倾斜形变异常特征的时间、空间分布可得出以下的结论:

强震前 3 a 在一较大的区域上可定量地检测出非线性异常频次增强, 震前可观测到两次较显著的、近于同步的异常强度高值; 近震源区震前 1 a 可可观测倾斜变形的相对静止、发散水平趋势下降或矢量打结现象; 临震前伴随有突跳性异常.

诚挚感谢吴翼麟研究员、周硕愚研究员和钱家栋研究员在研究过程中所给予的关心和帮助.

参 考 文 献

- 梅世蓉. 1996. 地震前兆物理模式与地震时空分布机制研究. 地震学报, **18**(1): 1~10
牛安福, 吴翼麟, 陈德福. 1995. 大同地震及其相关的异常倾斜场. 地震学报, **17**(4): 499~504
牛安福, 李旭东, 吴静, 等. 1998a. 地壳形变的 AF 值异常与在地震预报中的应用. 地震学报, **20**(4): 403~408

- 牛安福, 李旭东, 郑文衡, 等. 1998b. 丽江地震前后川滇地区地壳形变异常强度场及其演化. 地震, **18**(3): 303~307
- 吴翼麟, 李旭东. 1991. 定点形变方法多指标判别地震异常的追踪分析. 地壳形变与地震, **13**(1): 1~12
- 吴翼麟, 周克昌. 1993. 孕震区形变前兆的配套有序. 地壳形变与地震, **13**(增刊 2): 3~8
- Gitis V, Ponomarev A, Sobolev G. 1995. Dynamic fields analysis system. *Collected works of the Eurocenter of Geodynamics and Seismology*. Pub by Grand-Duchy of Luxemburg, 129~140
- Асатрян Х О, Соболев Г А, Мансунов В А. 1993. Развитие иерархии акустической эмисии в образцах горных пород при всестороннем сжатии. *Построение Моделей Развития Сейсмического Процесса и Предвестников Землетрясений*. Москва, “Наука”, 1: 17~37
- Бадари К, Соболев Г А, Фролов А Д. 1988. Комплексные предвестники разрушения крупных блоков горных пород. *ДАН СССР*, **299**(5): 1 087~1 091
- Лукк А А, Юнга С Л. 1988. *Геодинамика и Напряженно-Деформированное Состояние Литосфера Средней Азии*. Душанбе: Изд Дониш, 280
- Садовский М А, Болховитинов Л Г, Писаренко В Ф. 1987. *Деформирование Геофизической Среды и Сейсмический Процесс*. Москва: Наука, 101
- Соболев Г А. 1993. *Основы прогноза землетрясений*. Москва: Наука, 32~134