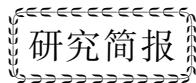


文章编号: 0253-3782(2003)04-0441-05



# 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究<sup>\*</sup>

牛 安 福

(中国北京 100036 中国地震局分析预报中心)

关键词 地倾斜 突变 地震 短期预测

中图分类号: P315.72<sup>+</sup>5 文献标识码: A

国内外岩石破裂实验研究、实验场观测及理论模式研究等都表明, 突变性变形是最可能的短期地震前兆, 其主要特征是持续加速变形. 其中与地震相关的突变, 称为前兆性突变, 或简称为有震变形; 发生突变性变形后若较长一段时间内没有相应的地震发生, 则是无震变形. 本文研究的主要是有震变形的特征.

提起突变, 自然可能会想到短暂的快速变化, 甚至不应有太长的持续时间. 实际上, 突变的内涵还取决于研究对象的时间和空间尺度. 对于地壳变形而言, 持续时间在几分钟到几天范围的突变性变化, 很可能是地震的短临前兆, 也很可能属于自然环境的影响. 为此, 本文研究的突变主要是持续时间在十几天至半年之内的变化, 即短期前兆特征. 其基本条件一是变形速度显著增加, 二是变形速度的稳定和持续. 两个条件从另一方面也给出了突变应具有巨幅特征和单调性.

由于突变性变形现象一般具有较为清晰的图象, 尤其可获得较为可靠的关于突变发生时刻、持续时间、突变幅度等物理参数, 因此, 对于研究变形与地震的关系提供了最大可能性.

尽管很多学者认识到震前出现的突变性前兆现象具有重要的预测意义(冯德益等, 1984; 冯德益, 1993; 周硕愚等, 1986; 周硕愚, 陈子林, 1993; 陈德福等, 1993; 梅世蓉, 冯德益, 1993), 但由于早期积累的前兆资料少, 因此, 对突变性变形前兆与地震之间关系尚未从定量的角度进行研究.

研究突变性变形前兆与地震的关系具有重要的意义(牛安福, 2002). 无论是同震变形还是震后蠕滑, 依据其变形场特征都可以估计出地震震源的基本参数(罗灼礼, 1980; 周克昌, 吴翼麟, 1990; Williams *et al.*, 1993). 对于与地震相关的前兆性变形, 其变形特征与地震之间存在什么样的关系, 依据变形突变能否对地震震级和地震地点进行一定的估计预测, 等等一系列问题都是本文欲研究的内容.

## 1 地壳倾斜变化的突变性

### 1.1 地壳局部倾斜

地倾斜的基本定义为

$$T_x = \frac{\partial u_z}{\partial x} \quad T_y = \frac{\partial u_z}{\partial y} \quad (1)$$

式中,  $T_x$ ,  $T_y$  分别为 EW 和 NS 向倾斜,  $u_z$  为垂直位移.

对于薄的地壳而言, 地壳局部持续加速倾斜可能导致断层的倾向活动, 而断层的倾向运动也容易引起地表倾斜的变化. 实际观测到的地倾斜变化, 反映了测点处沿垂向的剪应变(刘序俨, 1992, 1996).

\* 国家“十五”科技攻关项目(2001BA601B02-02)和地震科学联合基金(102069)共同资助.

2002-05-08 收到初稿, 2003-05-12 收到最后修改稿并决定采用.

我国西部地区地震活动大都与地壳倾斜有关。在有监测能力的地区，震前则可能监测到显著的地倾斜持续加速变化。

### 1.2 地倾斜观测

倾斜观测仪主要包括水管倾斜仪、金属摆、石英摆倾斜仪和钻孔垂直摆倾斜仪等。目前这些倾斜仪器的观测精度可达  $10^{-9}$ ，且连续性和稳定性较好。这些不同的仪器灵敏度不相同，观测的原理也不尽相同，在安放仪器的基岩未出现持续加速倾斜的状况下，各种仪器观测到的倾斜动态可能会出现无序的变化，在这种情况下，某些学者对前兆观测结果的质疑是可以理解的。但当基岩发生持续加速倾斜时，各种仪器记录到的结果则是有序的。这一点可从安装有多台倾斜仪的一些台站上的观测结果得到证实。

受自然环境的影响，倾斜观测结果往往受多种因素的影响。例如，气温、气压等气候变化都可引起短暂的突发性扰动；降雨可引起加速变形，但非持久。这类由自然环境变化引起的非持久性突变显然与地震的关系不大，只要选择持续时间较长的一些倾斜突变即可能降低其影响。另外，年变化对地震的孕育过程有一定的影响，因而，为研究与地震相关的变形不应轻易排除年变，但为检测地震前兆信息，可以容许做一些滤波处理或提出一些方法。此外，人类工程活动也可引起局部变形的突变性，但这种影响通过异常落实可被排除。

考虑到上述因素后，即可能获得信度较高的，且与地震相关的倾斜突变特征。

### 1.3 地倾斜突变的检测方法

倾斜突变的一个显著特点是异常变形幅度和持续加速变化时间不同于正常年变化过程。差分方法可给出瞬时变化，但给出的并不是真实的速率。为此，这里给出计算变形速率最基本的一个方法。

对于长时间固体潮汐观测，在给出一定的窗长度后利用模型式(2)，可计算出变形的速率  $V$

$$x_t = a_0 + V \cdot t + \sum A_k \cos(\omega t + \varphi_k) \quad (2)$$

对于非潮汐变形，该模型可简化为

$$x_t = a_0 + V \cdot t \quad (3)$$

由于与地震相关的变形突变都存在十几天到几个月的持续时间，为描述变形过程的速度特征，滑动时间窗长度一般应不低于突变持续时间的下限。为此，本研究选取滑动窗长度为 15 天，滑动步长为 1 天。

自 1990 年 1 月开始，在永胜台周围发生 5 次 6 级以上地震，分别是 1995 年 10 月武定 6.5 级地震、1996 年 2 月丽江 7.0 级地震、1998 年 11 月宁蒗 6.4 级地震、2000 年 1 月姚安 6.5 级地震和 2001 年 10 月永胜 6.0 级地震。这些地震的震中距离都小于 200 km。另外，1992 年和 1994 年分别在中缅交界地区发生 6.4 和 6.7 级地震，两次地震震中距较远；2001 年 2 月发生雅江 6.0 级地震，震中距近 300 km；其后，2001 年 4 月和 6 月施甸和盐源分别发生 5.8 和 5.9 级地震，两次地震的震中距较近。这些地震要么较远、要么震级接近 6 级，与突变的关系可作参考。

图 1 给出了永胜台地倾斜的动态变化。由图可知，该台倾斜中有较显著的年变化特征。分析台站周围 200 km 范围内每一次中强地震 ( $M \geq 6.0$ ) 前变形的特征，不难发现在中强地震前 EW 向倾斜的幅度和速度较无震年份变形(年变)的速度快、幅度大。

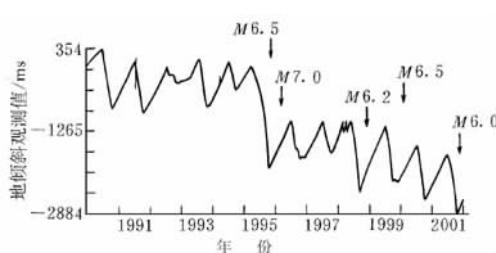


图 1 永胜台地倾斜的变化动态

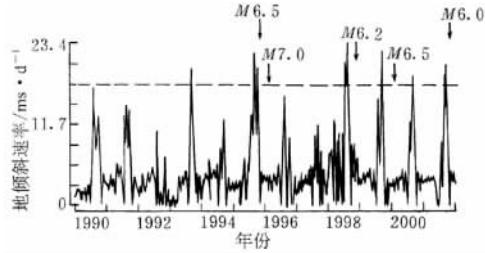


图 2 永胜台地倾斜速率变化(绝对值)

图2给出了永胜台EW向倾斜的速率。比较其速率特征与地震之间的关系不难看出,与地震相关的倾斜在震前往往表现出与正常年变(1992~1994年)不同的速率特征。在突变开始阶段,速率往往是持续加速的;速率达到的最大值则反映了持续加速阶段的速率。在达到最大值后,或维持一段的高速率变化,或逐步减慢,其原因在于滑动窗长的选取。

在分析最大速率变化与云南6级以上地震之间的关系时,其速率达到 $17.5 \times 10^{-3}$  s/d时可作为判别无震与有震变形的特征阈值。

## 2 地倾斜突变的物理特征与地震之间的关系

由图1,2倾斜突变的图象可知,震前与地震孕育过程相关的倾斜突变的特征是比较清晰的。分析每次地震前突变性倾斜的幅度与地震震级之间的关系不难看出,倾斜突变幅度越大,则与其对应的地震震级越大。这种关系表明,倾斜与地震之间可能存在某种联系。本节重点讨论突变性倾斜前兆与地震之间的统计关系。

自1990年以来,在我国地震活跃的西南地区、华北地区、西北地区和东南地区都分布有一定数量的地倾斜观测台站。这些台点在一些地震前都曾观测到显著的突变性倾斜现象。表1给出了震前倾斜突变的特征。

表1 1990年以来地倾斜突变前兆与地震的关系

地震	时间 年-月-日	震级	震源深度 /km	突变 测点	震中距 /km	突变开始时间 年-月-日	持续时间 /d	异常幅度 /ms	等待时间 /d
丽江	1996-02-03	7.0	10	永胜	66	1995-06-23	122	1 500	103
宁蒗	1998-11-19	6.4	12	永胜	66	1998-06-24	87	1 200	65
姚安	2000-01-15	6.5	32	攀枝花	145	1998-06-10	50	1 000	70
				楚雄	70	1999-05-07	120	654	125
				云龙	180	1999-05-17	110	210	103
				永胜	127	1999-07-04	89	1 000	105
				攀枝花	122	1999-08-03	50	223	84
缅甸	2000-06-08	7.0		楚雄	522	1999-11-07	153	800	60
大同	1999-11-01	5.6	17	西拨子	180	1999-07-02	20	70	103
施甸	2001-04-12	5.9	≤20	保山	53	2001-08-29	57	110	145
肃南	2001-07-11	5.3	≤20	肃南	142	2001-02-26	22	52	116
永胜	2001-10-27	6.0	15	永胜	73	2001-08-11	62	900	14
景泰	2000-06-06	5.9	≤20	乐都	200	2000-01-01	48	350	109
昆仑山	2001-11-14	8.1	10~20	乐都	1 060	2001-04-03	171	1 600	51
台湾	2002-03-31	7.5	46	厦门	500	2001-08-17	168	1 200	57

注:等待时间表示突变结束后至地震发生时刻间的间隔。

### 2.1 倾斜突变持续时间与地震震级之间的关系

突变性倾斜前兆是一特殊的自然过程,自突变开始至结束之间的时间段为突变持续时间。对于变化速度超过某一界值的变形过程而言,突变持续时间一定程度上也反映了倾斜异常的幅度。因此,突变持续时间与地震震级之间可能存在较密切的关系。

图3给出了我国大陆地震前观测到的地倾斜前兆持续时间与地震震级之间的关系。由此不难看出,其异常持续时间越长,震级越大。

通过最小二乘拟合,得到地倾斜突变持续时间与地震震级之间的统计关系式(4)。其中,震级拟合平均误差为0.35级。

$$M = 1.36 \lg T + 3.786 \quad (4)$$

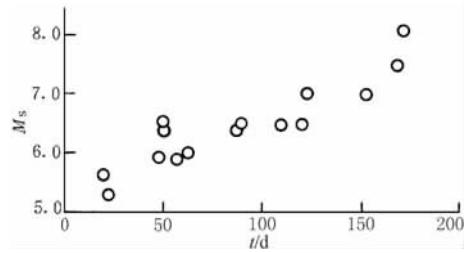


图3 倾斜突变持续时间与地震震级之间的关系

## 2.2 突变性倾斜前兆的空间分布特征

表 1 中也给出了震中距与震级之间的关系。由表 1 可知, 对于 6.5 级以下的中强地震, 突变点集中分布在震源附近 200 km 范围内。但对于 7 级以上的强震, 特别是在与地表断层面平行的主断裂带附近, 倾斜突变点距震中的距离可达上千公里(图 4), 需区别对待。对于震中距离较远的地震是否与突变相关, 关键是分析突变特征持续时间、突变幅度等是否相互满足所得到的统计关系。这里所提供的震例都是进行过迭代检验的。

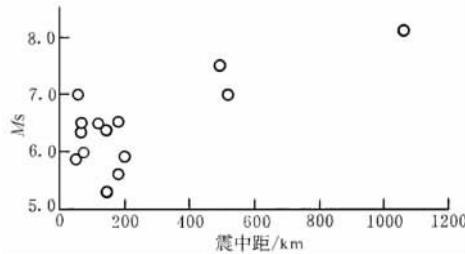


图 4 倾斜突变点震中距分布与震级的关系

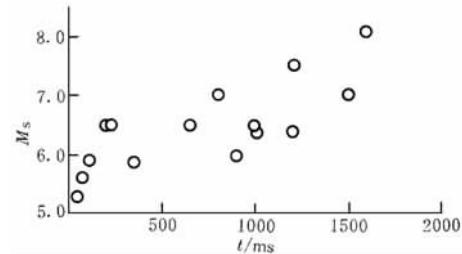


图 5 倾斜突变幅度与地震震级之间的关系

## 2.3 倾斜突变幅度与地震震级之间的关系

由表 1 同样不难看出变形幅度与地震震级之间的关系, 即突变幅度大, 则震级也相应地增加(图 5)。

另外, 考虑到倾斜随震中距的衰减, 本研究采取震级与变形幅度间的一般性关系模型(罗灼礼, 1980)进行拟合, 最后得到倾斜异常幅度与地震震级和震中距之间的关系模型

$$M = 0.57 \lg D + 1.14 \lg I + 11.87 \quad (5)$$

其中, 震级拟合的平均平方误差为 0.37 级, 这一误差水平与利用地震台网测量得到的震级误差基本是相当的。而该拟合误差较依据跨断层水准、地下水位突变幅度对震级模拟的误差(约 0.7 级左右)均较小。

值得一提的是, 尽管目前我们已有一些类似的经验性公式, 但由于“短期异常”概念的不确定性及异常特征的多样性等原因, 震级拟合的精度都难以达到以倾斜突变幅度进行震级拟合的误差水平。

## 3 前兆性突变现象的物理解释

受倾斜监测能力的影响, 在中国大陆地区并不是所有地震前都能观测到倾斜突变现象。但从短期预测角度来看, 并不是每一次倾斜突变后都伴随有地震。在排除一些干扰因素后, 符合倾斜突变与地震之间关系的异常所占比例在 65% 左右。

突变性变形过程是介于静态位错与震时位移之间的一种准动态过程, 既不同于一个静止的位错, 也不同于震时的破裂。因此, 这一过程的特征也表明了在突变性过程结束后, 地震的发生都有一个等待时间。该等待时间反映了震前较普遍存在着的应力调整过程。图 6 给出了倾斜突变过程达到极值点后地震的等待时间分布。其结果表明, 震级越大, 等待时间越短。

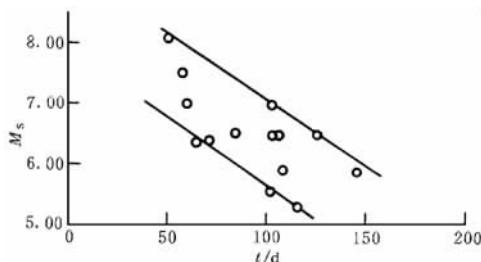


图 6 倾斜突变达到极值点后地震的等待时间分布

突变性变形点分布具有非均匀性特征。从俄学者 Садовский 等(1982)提出地壳介质的离散等级结构模型到地震前实际由 GPS 观测到的最大剪应变场, 以及大面积水准速率分布情况来看, 即使是在同一构造块体上, 地壳形变场也可能存在较显著的差异性。而定点形变观测实际上是形变场变化的一部分, 因此, 前兆性突变点分布的非均匀性应不难理解。

本研究依据地震前观测到的地倾斜突变特征,

给出了关于突变性倾斜特征与地震震级、地点要素之间的关系,对于估计区域地震危险性仍是有意义的。依据观测到的倾斜突变特征,可对短期地震危险性水平给出估计,也可对震后地震趋势提供技术分析依据。一次地震发生后,如果地震震级与由形变给出的短期地震震级相比明显偏低,则应注意短期内发生更大地震的可能性;反之,如果震级相当,则该地震的震级可能是短期内该地区的最大震级或极限震级。

值得说明的是,对于各种不同尺度的持续时间,其形变突变的意义是不同的。本文研究的主要是在15天至半年范围内的短期变形特征。该时间范围内的突变实际上既考虑了降低外界环境干扰,也顾及到了正常的年变对震级估计的作用。而对于持续时间在1天或几小时或几分钟的突变,既可能与观测环境变化有关,也可能是地震的短临前兆,不确定性因素较大。

## 参 考 文 献

- 陈德福,李正媛,李晓军。1993. 地倾斜短临前兆信息特征[J]. 地壳形变与地震, 13(增刊2): 47~54
- 冯德益,潘琴龙,郑斯华。1984. 长周期形变波及其所反应的短期和临震地震前兆[J]. 地震学报, 6(1): 41~57
- 冯德益。1993. 构造波及其在地震预报中的应用[J]. 地壳形变与地震, 13(1): 1~13
- 刘序俨。1992. 联合倾斜和重力固体潮资料检测地面倾斜[J]. 地壳形变与地震, 12(4): 26~29
- 刘序俨。1996. 地壳形变的普适表达与对倾斜的再认识[J]. 地壳形变与地震, 16(3): 40~43
- 罗灼礼。1980. 震源应力场、形变场和倾斜场[J]. 地震学报, 2(2): 169~184
- 梅世蓉,冯德益。1993. 中国地震预报概论[M]. 北京: 地震出版社, 308~324
- 牛安福。2002. 地壳变形的突变性与地震短期预测[J]. 国际地震动态, (2): 10~12
- 周克昌,吴翼麟。1990. 由同震阶跃应用反演方法研究震源机制[J]. 地壳形变与地震, 10(1): 1~8
- 周硕愚,董慧风,宋永厚,等。1986. 用信息论方法研究大震前的突变异常[J]. 地震学报, 8(增刊): 121~133
- 周硕愚,陈子林。1993. 地震短临前兆机理与断层形变前兆标志[J]. 地壳形变与地震, 13(增刊2): 16~22
- Williams C R, Arnadottir T, Segall P. 1993. Coseismic deformation and dislocation models of the 1989 Loma Prieta earthquake derived from Global Positioning System measurements[J]. *J Geophys Res*, 98: 4 567~4 578
- Садовский М А, Воховитинов Л Г, Писаренко В Ф. 1982. О свойствах дискретности горных пород[J]. *Физика Земли*, (12): 3~18

## STUDY ON THE SUDDEN CHANGES IN GROUND TILT AND EARTHQUAKES

Niu Anfu

(Center for Analysis and Prediction, China Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

**Key words:** ground tilt; sudden changes; earthquake; short-term prediction