

几次地震的形变异常与地震预报探讨

袁 铭

(国家地震局第二测量大队)

一、引 言

近年来,我国西北地区的地震活动明显增强,甘宁青地区发生了一系列中强地震,其中门源、灵武、礼县地震前后观测到了明显的形变异常。地震前后的形变曲线大体可分为准线性变化、非线性变化、震后反向变化等三个阶段,分别对应应变能的积累、加速积累与释放过程。由于各观测场地震中距不同,场地所跨断层介质性质不同,因此三个阶段的曲线形态也有所不同。分析各阶段形变曲线的变化形态、变化持续时间以及它们之间的关系,有助于探讨西北地区中长期地震预报的途径。

二、地震前后的形变异常特征

1. 门源地震

门源地震(表1)发生在北祁连断裂带所属冷龙岭山脊断层上^[1]。震中距最近的水准观测路线(甘肃民乐—青海西宁,下称民西线)的垂直距离约30公里,距最近的跨断层观测场地(扁都口场地)约75公里。门源地震前后的形变主要有如下特点:

表 1

发震地点	发震时间	震级 Ms	震中位置	
			ψ	λ
青海门源	1986.8.26	6.4	37°37'	101°33'
宁夏灵武	1984.11.23	5.3	38°04'	106°13'
甘肃礼县	1987.10.25	5.0	33°52'	105°10'

(1) 1983年以前,民西线扁都口—青石咀一段观测曲线反映出冷龙岭地区相对两侧盆地下沉。1983年以后,山区开始大幅度上升,出现异常形变^[2]。

(2) 扁都口形变测量场地 AD、AB 水准测线及基线分别跨越两条断层(图1)。在1971—1979年和1979—1985年的两个时段内,各测段所反映的形变速率呈阶段性减慢。以基线为例,第一时段平均速率为每年1.3毫米,第二时段平均速率为每年0.8毫米。1985年至门源地震前,各测段形变速率发生明显变化,基线及AB水准变化曲线基本停止变化(跨同

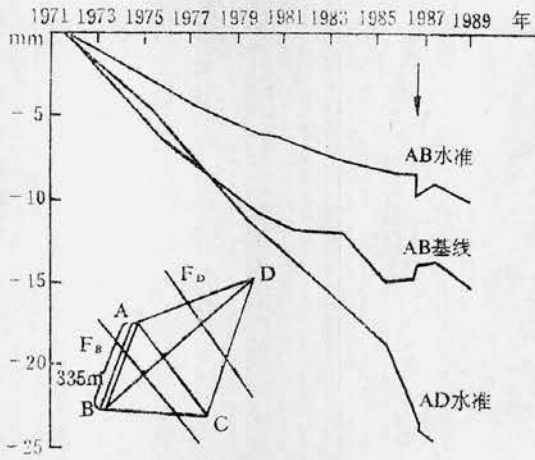


图1 扁都口跨断层测量场地形变曲线

灵武—东山断裂北段附近。该断裂为一隐伏基底断裂，全长70余公里，呈S型展布，断面西倾，显示张性正断层性质。它控制了灵武一带银川地堑的东界。

灵武地震前，跨该断裂的水准测线有明显的异常反应。灵武测线于1972年开始观测，测线走向东西，穿越灵武—东山断裂北段，从1972年至1988年4月共有9次复测资料。图2为跨断层测段所反映的高差变化曲线。由图2可见，1976—1981年，断层西盘（上盘）相对东盘下降，年变化量为1.2毫米。1981年6月—1984年5月，两盘相对变化速率已达到每年2.1毫米，显示了断层的加速运动。半年后即1984年11月发生了灵武5.3级地震，震中距该测段数公里。震后于1985年4月进行了复测，复测结果与震前比较无明显变化。1985年8月的复测结果表明，两盘相对垂直位移达到5.8毫米，此时两盘相对位移方向改为上盘相对上升。

3. 礼县地震

礼县地震（表1）震中位于江口观测场地附近。该场地跨彭家崖—风台山弧形断裂。该断裂总体呈南北走向，在场地内呈S形延伸，倾向北西，全长11公里（地表出露），为一顺时针扭动的斜冲断裂。据震后考察分析，该断裂即为礼县地震的发震构造。江口流动水准测量始于1983年，至1988年9月共有24期观测资料，对形变曲线的分析表明，礼县地震的形变过程可分为4个阶段（图3）：

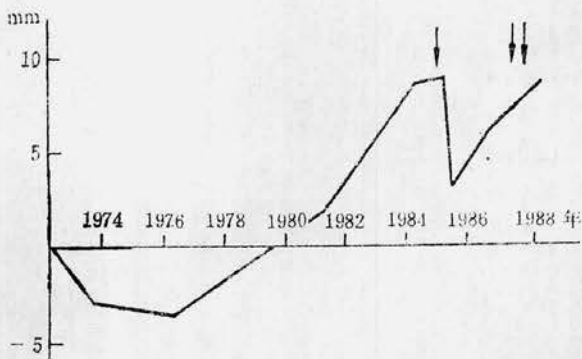


图2 灵武支5—6跨断层垂直形变曲线

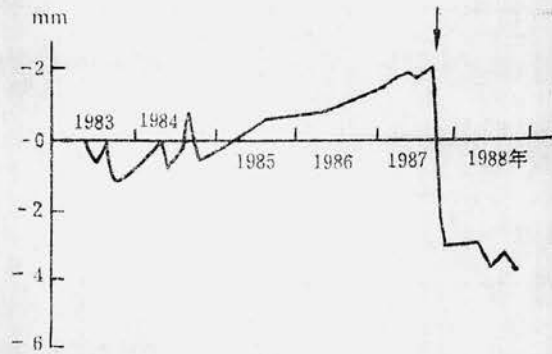


图3 礼县江口跨断层垂直形变曲线

（1）正常形变阶段。时间从1983年至1984年9月。此阶段所反映的一些变化只是由环境条件引起的年周期变化，量级小且无趋势性。

一断层），而AD水准变化曲线则大幅度加速，一年间高差变化量达4.3毫米，为1985年以前形变速率的3倍。曲线停止或加速变化打破了原有的形变速率比较稳定的规律，是地震前的形变异常表现。

（3）门源地震前后观测时间间隔仅为2个月，但观测值有显著变化，其中基线反向伸长0.7毫米，AB、AD水准观测值则分别变化1.4与1.1毫米。

2. 灵武地震

灵武地震（表1）震中位于南北走向的

* 据1984年中国地震年鉴，其发震构造为一潜伏地下的北北东向断层。

(2) 异常形变阶段。时间从1984年9月至1987年5月。此阶段形变曲线发生明显趋势性变化,变化量达2.5毫米,断层上盘上冲。

(3) 震前形变阶段。此阶段历时5个月,1987年5、7、9月的三次观测值基本保持不变。

(4) 形变反向阶段。震后形变曲线急速回返,一个月左右变化幅值达4.3毫米,为震前二年半趋势变化总量的近2倍。

虽然上述三个震例的观测期数不同,场地与震中的距离不同,但地震前后的形变异常曲线都经历三个阶段:

(1) 准线性变化阶段

此阶段内形变曲线呈趋势性变化,而形变速率变化不大,表明在区域应力持续增加的情况下,断层位移量也随之加大。在岩石力学中,此阶段称为介质的弹性变形阶段。

(2) 非线性变化阶段

与上一阶段比较,此阶段内的形变曲线速率发生明显变化,应力的进一步增加影响受力岩体的变形状态,使得断层两盘相对运动速率发生变化。断层位移速率明显改变有两种表现形式,其一是运动速率加大,其二是由于断层的摩擦系数变大,岩浆胶结或两条断层交汇产生阻挡作用,使得断层发生闭锁,即运动速率为零。文献[3]用物理模拟与数学模拟方法对闭锁区附近的应变场进行了研究,结果表明如果将断层错动的闭锁区做为震源考虑,震前闭锁区的应力值虽高但位移值却不高。

需要指出的是,形变曲线的非线性阶段与应力—应变曲线上的弹塑性阶段其意义有所不同,前者只表明断层运动速率的变化,根据场地处断层与震中的距离不同,这一阶段有可能并未产生塑性变形。而后者表示受力时岩石介质所处的变形状态,处于这种状态的样品已经发生了塑性变形。

(3) 震后反向变化阶段

此阶段形变曲线的表现形式亦有两种,即震后反向—恢复(如图1)或震后反向—正常(如图3)。造成这两种断层运动形式的原因除与介质条件有关外,还与观测场地与震中的距离及与发震构造的相对位置有关。门源地震震中距扁都口75公里,其发震构造与扁都口场地所跨断层相邻,而江口场地即在礼县地震震中,所跨断层即发震构造。因此门源地震发生时,扁都口场地附近的断层很可能还处于弹性变形阶段,正如图1所示,震后断层形变可以恢复至震前状态。而江口场地附近的断层在非线性阶段时已进入塑性变形阶段,如图3所示,震后断层两盘相对位置变化很大,其相对位移速率回到准线性变化以前的正常状态,表明此时应力积累已完全解除。

三、对预报问题的认识

1. 地震趋势的预测

基于上述分析,可以通过观察震后反向阶段的形变曲线形态预测某一特定时间内是否还有地震发生。

文献[4]认为强震的余震区是地震断层发生应力调整的表现形式,其范围的大小即可反映震源体的大小,也可反映地震断层的规模。根据文中给出的地震断层长度与震级的公式:

$M = 2.3 + 1.13 \ln L$, 可以计算出门源、灵武、礼县地震的震源区半径分别为18.8公里、7公里和5.5公里(式中M为震级, $\frac{1}{2}L$ 为所求半径)。如果以震源区外至5倍半径之间的区域为近源区, 那么江口场地位于震源区, 扁都口场地则位于近源区。在震源区内如果场地所跨断层即为发震构造, 则震后形变曲线反向后应该转为正常, 否则可能还有地震发生。这个地震可能属于同一地震序列, 也可能不属于同一序列, 但时间间隔不会很长。

灵武支线场地位于震源区, 1984年11月5.3级地震发生后, 形变曲线反向, 接着又继续震前的趋势变化, 到1988年4月, 年变化速率为1.9毫米(图3), 与震前2.1毫米的年变化速率相当, 这期间于1987年8月及1988年元月又分别发生5.5级、5.4级两次地震, 震后观测表明曲线仍在继续变化, 因此近一、二年或稍长一段时间内还有发生中强地震的可能。值得指出的是, 灵武支线的观测周期很不一致, 复测间隔时间有时很长, 这对于地震多发区的监测是远远不够的。

位于近源区的扁都口场地附近的断层形变在经历了门源地震后的恢复阶段后, 又开始呈现了与震前相似的准线性变化。从基线的形变速率来看, 这很可能不是一种正常状态。在1983年6月—1985年5月(门源地震前一年多)的时间内, 基线年变化速率为1.6毫米, 1987年—1988年的年变化速率为1.7毫米, 二者数值相当。因此形变曲线目前可能处于由准线性阶段即将进入非线性阶段的状态。

对震后形势预测的物理机制可能与每次地震能量的释放过程有关, 在此不准备述及。

2. 关于地震危险区的预测

文献1)曾指出, 前兆较少的走滑型地震常发生在巨大活动断裂带的闭锁段, 认为跨断层的水平和垂直测量对于寻找断裂带的闭锁部位非常重要。根据跨断层形变测量资料的分析结果^[2], 位于河西走廊南侧的祁连山北缘断裂带具有东西两段活动性强, 而中段几乎不活动的特点。作者最近的分析表明, 其垂直形变表现出四象限分布特征, 断裂整体运动形式为剪刀型垂直错动, 中段为剪刀型错动的中轴, 这是一个闭锁区段, 因此这一地区可能是未来地震危险区。

3. 关于发震时间的预测

由图1—3可见, 三次地震前都有断层位移量为零的闭锁阶段出现, 可见从时间轴上寻找闭锁时段对于地震的时间预报具有重要意义。但在地震发生之前, 一般不知道非线性阶段会持续多久, 非线性阶段的出现只表明准线性阶段的持续时间与地震的临近, 因而利用非线性阶段的延续时间来估计发震时间是困难的。这时可以通过求上述地震前各形变异常时段的比值间接求得。

从观测曲线看, 礼县5.0级地震其准线性阶段历时32个月, 非线性阶段历时5个月; 灵武5.3级地震的两个阶段分别为35个月和6个月; 而门源6.4级地震的非线性阶段就经历了大约14个月。很明显, 不仅异常时间与震级成正比关系, 而且震前的准线性阶段与非线性阶段之间也有一定关系, 即准线性阶段越长, 非线性阶段也越长。这种关系具有普适性特征^[5], 其比值礼县地震为6.4、灵武地震为5.8, 以均数6与准线性时段之比可求得非线性时段。例如利用此法求得礼县、灵武地震的非线性时段分别为5.3个月和5.8个月。当然, 已知非线性

1) 梅世蓉, 大陆地震预报问题, 1987.

时段也可求得准线性时段，例如可以估算出门源地震的准线性时段为84个月。前文指出扁都口场地的形变速率减慢阶段是从1979年开始的，这与上述推算时间基本吻合。

4. 关于震级的预测

根据震级与前兆时间的经验公式 $M = 2.4 + 1.32 \log T^2$ (T以天为单位)，将三次地震的异常时间150天、180天、420天代入，分别得到的震级为5.3、5.4、5.9。考虑到上式是由地震活动性得出的经验公式，同时有的场地观测周期比较长，因此该式只能用于粗略的震级估计。

四、讨论与建议

1. 通过以上分析可知，一个5级左右地震，其非线性阶段约为半年左右，一个6级左右地震则为一年左右，据此可以安排监测周期。对于5级以上地震的危险区，其跨断层测量的周期可以为每年等间隔观测三次。对6级以上地震危险区一年只需观测一次即可。这比在地域广阔的大西北全面观测多次无疑要经济有效得多。

2. 根据对跨断层资料的分析，基线丈量边长的变化量一般大于水准观测高差的变化量。由于水准观测具有经济、方便的特点，因此被广泛采用。与基线测量相比，场地分布密度也高得多，但它对震前异常反应的“灵敏度”较基线要低。例如在上述地震的近源区还布有一些流动水准场地，震前皆无明显反应。目前西北地区特别是南北地震带北段常年监测的场地中，水平观测场地甚少，这不能不认为是一种欠缺。

上面仅讨论了地震的中长期预报，由于资料所限，本文未能对短临预报进行探讨。根据以上分析，是否可以在某一观测场地形变曲线的非线性阶段出现后，立即缩短观测周期，捕捉地震前的短临异常，这也许是一种可行的方法。

巩守文同志对本文提出了宝贵建议，仅此致谢。

参 考 文 献

- [1] 兰州地震研究所、青海省地震局联合考察队，1986年8月26日门源6.4级地震考察的初步总结，西北地震学报，Vol. 9, No. 2, 1987.
- [2] 袁铭、吉备，河西走廊及其南缘地区形变特征与区域应力场，地壳形变与地震，Vol. 7, No. 4, 1988.
- [3] 马瑾、张渤海、袁淑荣，断层闭锁区附近应变场演化的初步探讨，地震地质，Vol. 1, No. 3, 1979.
- [4] 李玉龙，几个地震地质与地震活动特点的讨论，兰州城乡建设，增刊，1987.
- [5] 秦保燕，复杂震源系统非线性阶段的多层次性及大震的中、短、临预报，西北地震学报，Vol. 9, No. 1, 1987.

DEFORMATION ANOMALIES OF SEVERAL EARTHQUAKES AND PRELIMINARY STUDY ON EARTHQUAKE PREDICTION

Yuan Ming

(Second Seismo-Geodetic Brigade, SSB, Xi'an, China)