

# 四川汶川 8 级地震地应力异常

——来自压磁频率应力测量系统的记录

张培耀<sup>1)</sup>, 张道仪<sup>2)</sup>, 朱万宁<sup>2)</sup>, 范良龙<sup>1)</sup>, 陈若萍<sup>2)</sup>, 延军<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地壳应力研究所, 北京, 100085; 2) 中国辐射防护研究院, 太原, 030006

**内容提要:** 2008年5月12日四川汶川发生8级特大地震,我们利用压磁频率测量系统在1000多公里以外记录了这一震惊世界的自然灾害。汶川地震发震前94天,地应力出现大幅度快速变化的短期地震前兆,三个受力元件分别受压633.5 Pa、1512 Pa、4561.4 Pa。临震前几小时指向震中方向的元件出现4次脉冲式突跳的临震异常,然后大地震发生了。距离震中1000多公里的中国辐射防护研究院台站(简称:中辐院台)完整地记录了大地震前表层剧烈形变的力量加强过程,这验证了李四光先生1973年提出的“在较大范围内、不同的活动断裂上,不同的地点可以获得相同的应力状态”的论点。本测量系统具有灵敏度高、动态性能好的优点,它抗干扰能力强,克服了采用电压、阻抗、电感信号传输的测量系统长期测值不稳定的干扰因素。该压磁频率应力测量系统不仅可安装在山地岩石中,也可应用于广大平原地区。可测量到快速变化的地震面波,能获取短临地震前兆信息,传感器安装在土层或岩层中,都能起到预报地震的效果,因而具有非常广阔的应用前景。

**关键词:** 8级地震; 地应力异常; 临震预报; 压磁频率地应力测量系统; 汶川; 四川

1966年邢台地震后,李四光教授组织地质科学院地质力学所科研人员共同研究采用哪种方法开展相对应力测量,其目的是测量地应力随时间的变化,也是配合地质力学理论和方法进行地震预报,应用其测量资料反推应力值的相对变化量,从而了解测区应力状态,这是地震预报工作的主要环节(李四光,1973)。最后决定采用瑞典科学家哈斯特用于坑道中应力绝对测量系统。此方法只用于坑道测量,特点是钻孔浅、便于安装传感器,元件灵敏度较低,但稳定性好,工作时间短,几个小时就完成了作业。而我们选用的相对测量与他们不同之处是钻孔深几十米或上百米,测量元件必须具备较高的灵敏度及稳定性,传感器长期泡在水中,绝缘度必须良好,并有较好的抗干扰能力。

经研究后,在1966年3月15日,第一个应力观测孔由地质力学所在河北省隆尧县山口村地震台(简称:隆尧山口站)用钢钎打孔,孔深2m,安装65型压磁应力计(直径36mm),使用6035型交流电桥进行观测。然后,这项任务由地质部地震地质大队(本所前身)负责机加工及研制,并在华北地区建立地应力站,经过几年的室内实验和野外测试之后,

1973年完成了DIL-110型压磁应力传感器野外试验工作,1985年之前,全国安装了105个地应力站,这些应力站都采用电压、阻抗、电感信号传输,由于抗干扰能力差,所有资料都出现悬空元件与受力元件同步变化情况,所以有些部门提出:“电感地应力观测中所使用的各种型号仪器,其共同的问题是观测资料变化的规律性差,且钻孔中受力元件和悬空(非受力)元件的变化往往同步,表明其观测的物理量不明确。因此,电感地应力台站不宜发展,应尽可能以钻孔应变仪予以取代。”这样,全国100多个地应力台站大部分停测。1985年之后,压磁地应力测量系统研究经费中断,只有极少数台站经各方筹集经费坚持工作。

自1986年开始,压磁频率地应力测量系统到野外地震台安装试测,先后建成了福建省莆田地震台、广东双塘地震台、中辐院台、太原晋祠基准台共4个台站。目前除了中辐院台正常运转外,其余3个台站都先后停测。因此,这次四川汶川大地震只有中辐院台资料。地震预报三要素中震中位置必须3个地应力站的最大主应力方向交汇后才能确定。而一个台的资料无法确定地点,只能知道发震地点的方

向,这是一个缺陷或遗憾。

1997 年 1 月 20~28 日,“联合国发展资助与管理服务署及国家科委”在北京友谊宾馆召开“灾害科学与公共管理国际研讨会”,邀请电感法地应力提供展板及实物到会上展出,并作了详细介绍,得到各国专家的好评。

## 1 系统的原理、功能特点和台址的选择原则

该系统是利用铁磁物质的磁致伸缩原理制作磁弹式传感元件,以一定的预加应力安装在岩孔或土层中(图 1),当测区应力状态发生变化时,岩孔或土层的力学量改变了预应力状态元件的磁特性,由于磁弹性效应而引起磁导率  $\mu$  的变化,借助电磁转换装置变为频率信号传输到地面仪器,便可以记录下反推的应力值的相对变化量,从而了解地壳应力的变动(图 2)。

该系统配有 64KB 的数据存储器,可存储 8 小时的瞬时采样值、1440 组段均值和 365 天的日均值;主机采用 RS232 接口;可连接打印机打印组段均值和日均值;配备高稳定度电源,具有断电保护功能,具有很强的电网噪声抑制能力。

该系统特点是灵敏度系数高,干扰因素小(张培耀等,1992),输出信息大,结构简单,坚固耐用,工作可靠以及能在恶劣环境中工作。

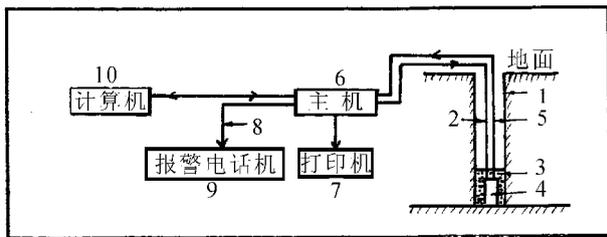


图 1 数字式压磁频率地应力测量系统工作原理框图

Fig. 1 Process chart for the earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency

1—钻孔; 2—传感探头电源导线; 3—水泥砂浆; 4—传感探头; 5—信号传输电缆; 6—主机; 7—打印机; 8—报警信号线; 9—报警电话机; 10—计算机

1—Drill; 2—power wire of sensing probe; 3—cement mortar; 4—sensing probe; 5—signal transmission cable; 6—host device; 7—printer; 8—alarm signal line; 9—alarm telephone; 10—computer

地震是地壳构造中断层活动的产物,有密切联系的构造带都是受同一地应力场的控制。在较大范围,不同的活动断裂上,不同的地点可以获得相同的



图 2 压磁频率应力测量系统

Fig. 2 The earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency

应力状态(李勇等,2008),因此在活动断裂带附近设立应力观测点了解应力积累的过程、应力的方向、大小,可以对地震的预测提供依据。中辐院台位于山西省太原市的南端,太原盆地内,西面靠近北北东向山西断陷带,毗邻太原盆地西侧的交城断裂,该断裂呈北北东—北向,系新生代以来的活动性断裂,具倾滑及斜滑运动方式,并具有一定水平分量的右旋活动特征。传感器安装在潜水位以上的致密粘土层中,孔深 18.6m,这样的台址所记录的异常资料比较真实可靠。

## 2 四川汶川 8 级大地震实况

2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分,四川汶川县发生 8 级地震,地震最大烈度达 11 度,破坏特别严重的地区超过 10 万平方公里,震前,中辐院台记录了地震前兆异常(Dong Shuwen et al., 2008; 李勇等, 2008; 李忠权等, 2008; 刘树根等, 2008; 杨主恩等, 2008; 张岳桥等, 2008; 朱介寿, 2008)。

### 2.1 地震地应力趋势异常及最大主应力方向偏转

“地震是由于地球表层产生剧烈的形变而引起的震动”。李四光教授在 1970 年 3 月指出:“产生这种形变的巨大力量,不可能突然出现,必然有个积累加强的过程。我们的探测手段如若正确反映那股力量加强的过程,那就等于正确地反映地震将要发生的前兆”。他的话给我们研制测量地应力仪器指明

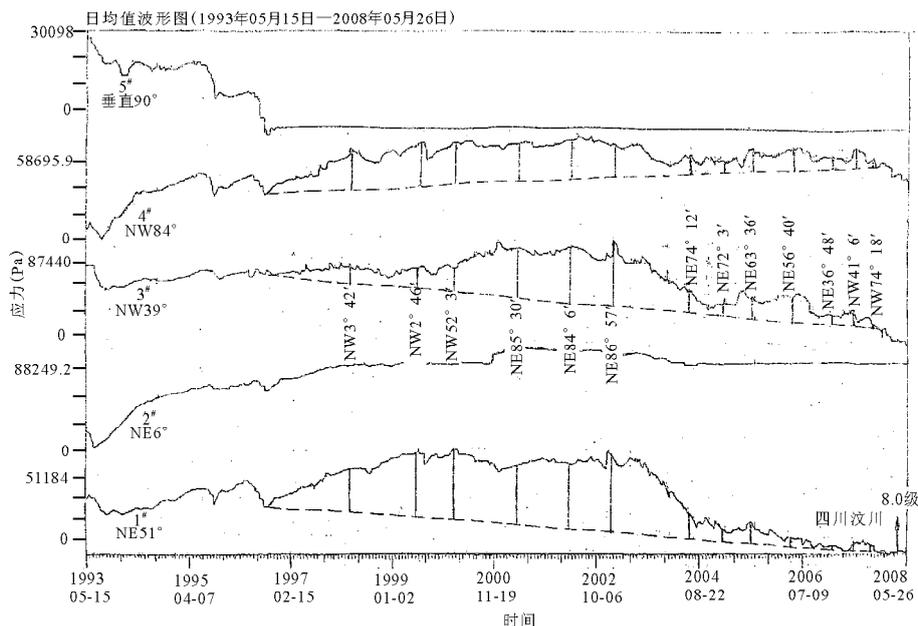


图 3 四川汶川 8 级地震前,太原中辐院台地应力趋势异常图及最大主应力方向偏转图

Fig. 3 Deflection map of maximum principal stress directions before  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

方向,经过 40 多年的努力,我们研制的应力测量系统完整地记录到四川汶川 8 级地震地应力积累加强全过程。中辐院台于 1993 年 5 月使用 PYL-III 型应力仪,积累了 15 年的观测资料(图 3),从图 3 中不难看出,自 1996 年 6 月中旬到 2003 年 5 月,4 个受力元件测值一致上升,7 年时间是地应力在具有弹性的岩石范围内缓慢积累阶段,并且最大主应力方向逐渐接近震中方向,自 2003 年开始,地应力快速积累,这一快速积累阶段,对于地震的发生可能起到积极的推动作用,此后应力的积累阶段进入应力调整阶段,当应力积累到一定程度时,最大主应力方向出现从 NNE 到 NNW 偏转,这种偏转或许是岩石中有一部分力因发生塑性形变而释放,而大部分还在积蓄起来,地应力达到一定程度,岩石抵抗不住了,便发生破裂,产生震动。

地震预报三要素也是从地应力趋势异常图(图 3)提供的。

(1) 地震的震级预测:地应力趋势异常时间和异常信息大小(幅度)被用来推算地震震级的依据,异常持续时间越长,幅度越大,震级越大。

(2) 震中位置的预测:得出三个地应力台站的趋势异常主应力方向之后,根据三个台站的位置和各台站主应力方向则可交汇一点或一个面,此点或面则是地震发生的可能位置,图 4 DIL-一压磁地应力测量资料计算唐山 7.8 级地震震前两星期各台站

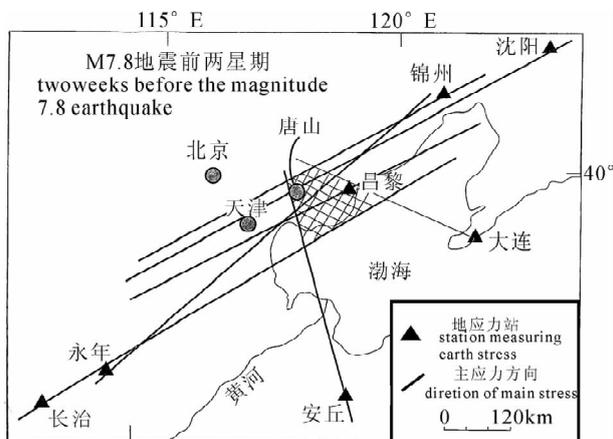


图 4 DIL-一压磁地应力测量数据的交汇区 预测是唐山地震震中位置

Fig. 4 Predicted epicenter of Tangshan earthquake in Hebei Province lie in the cross area of measuring data using DIL- earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency

的最大主应力方向交汇情况,震中(唐山)就在交汇点范围内。

地应力预报地震时间的方法通常分为跨越法和追踪法,两种办法结合效果较好。

跨越法——地应力前兆变化过程分为三个阶段,第一阶段为异常开始发展到极值;第二阶段为地应力快速变化;第三阶段异常开始恢复到发震,据统

计第一阶段时间长于第三阶段,其时间长短的比值为 1.2~1.5。

追踪法——出现短期或临震异常后,结合跨越法才预测发震时间。

### 2.2 汶川地震前地应力短期地震前兆

短期地震前兆应力大幅度快速变化异常,异常时间几个小时,应力变化小时只有几百帕到几千帕(张道仪等,1990)。图 5 汶川大地震前中辐院台三个元件同时大幅度快速下降,NE51°元件受压 633.5 帕,NW39°元件受压 1512 帕,NW84°元件受压 4561.4 帕,最大主应力方向为 NW71°这种大幅度快速下降或许是震中区受一种巨大力量使它发生突然急剧的变化,这就容易在急剧变化地区发生震动。

### 2.3 汶川大地震前地应力临震异常

临震异常一般表现为脉冲式突跳,多发生在震前几小时到几十个小时,应力变化小时只有几十帕,这些突跳或许是地震的主破裂,大蠕动的信号,汶川大地震前中辐院台 NE51°元件超前 13 小时 58 分;9 小时 28 分;(图 6a)2 小时 38 分;2 小时 18 分(图 6b)共 4 次突跳,这 4 次突跳分别有 23.3 帕、23.3 帕、25.2 帕、24 帕的张性应力变化,然后地震发生了,图 7 为 8 级地震的地震波图。临震前,最大主应力方向没有指向震中,但是突跳的元件方向往往指向震中。

### 2.4 四川青川 6.4 级地震地应力临震异常

青川 6.4 级地震前,中辐院台 NE51°元件同样超前 13 小时 7 分 50 秒;12 小时 18 分 47 秒;7 小时 51 分 19 秒(图 8)三次突跳,并分别受 25.7 帕、23.8

帕、22 帕的张性应力变化,5 月 25 日 14 点 21 分青川发生 6.4 级地震,图 9 为地震波图。从地震波图看出,NE51°元件震前 3 个小时开始快速受压,而夹角 90°的 NW39°元件同样时间受张,而地震之后两个元件同样 3 个小时复原,而夹角 45°的 NW84°元件比较稳定,这说明传感器受了很大的压力,因为传感器安装在土层中,外壳是不锈钢筒,4 个受力元件固定在钢筒里面,相互夹角为 45°,青川 6.4 级地震震中方向为 NE54°,而传感器 NE51°元件受压(图 10),由于压力过大,钢筒都压变形,夹角 90°的 NW39°元件受张,发震之后压力缓慢减弱,钢筒也同样缓慢恢复原位。

## 3 测量系统的可靠性

### 3.1 4 个元件测值的互检

福建莆田地震台记录到 1987 年 8 月 2 日江西寻乌 5.6 级地震前速率异常相对偏差,见图 11 和表 1。

表 1 福建莆田地震台记录的江西省寻乌 5.6 级地震地应力值

Table 1 Earth stress value of the  $M_s$  5.6 Xunwu earthquake in Jiangxi recorded by Putian seismic station, Fujian Province

元件方向	EW	N45°E	NS	N45°W
元件灵敏度(字/帕)	0.05386	0.02825	0.02600	0.06356
1987 年 7 月 20 日 10:00~22:00 变化量(字)	-194	-124	-149	-315
同上时间,应力值(帕)	-3602	-4389	-5731	-4956

据夹角 45°的元件计算主应力方向公式为:

$$tg2\omega = \frac{s_1 + s_3 - 2s_2}{s_1 - s_3} \quad \left( \frac{s_1 - s_2}{\cos 2\omega} > 0 \right)$$

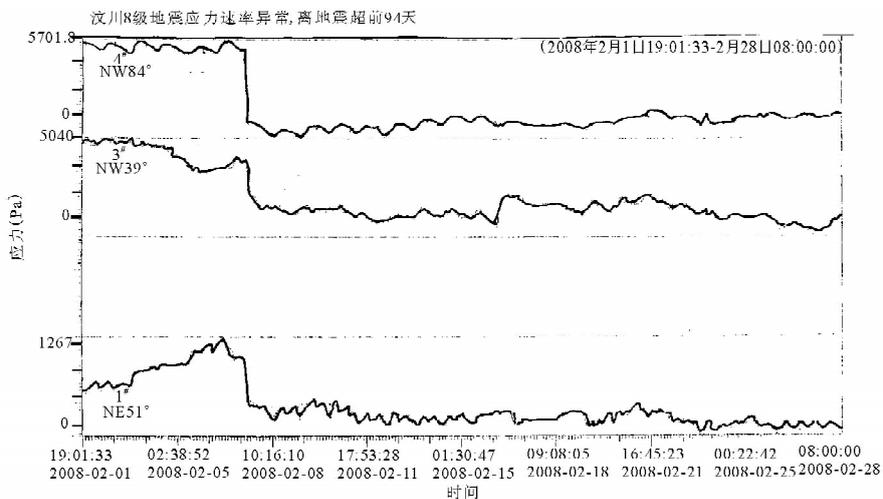


图 5 中辐院台记录的汶川 8 级大地震地应力速率异常图

Fig. 5 Velocity abnormality map of earth stress in  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

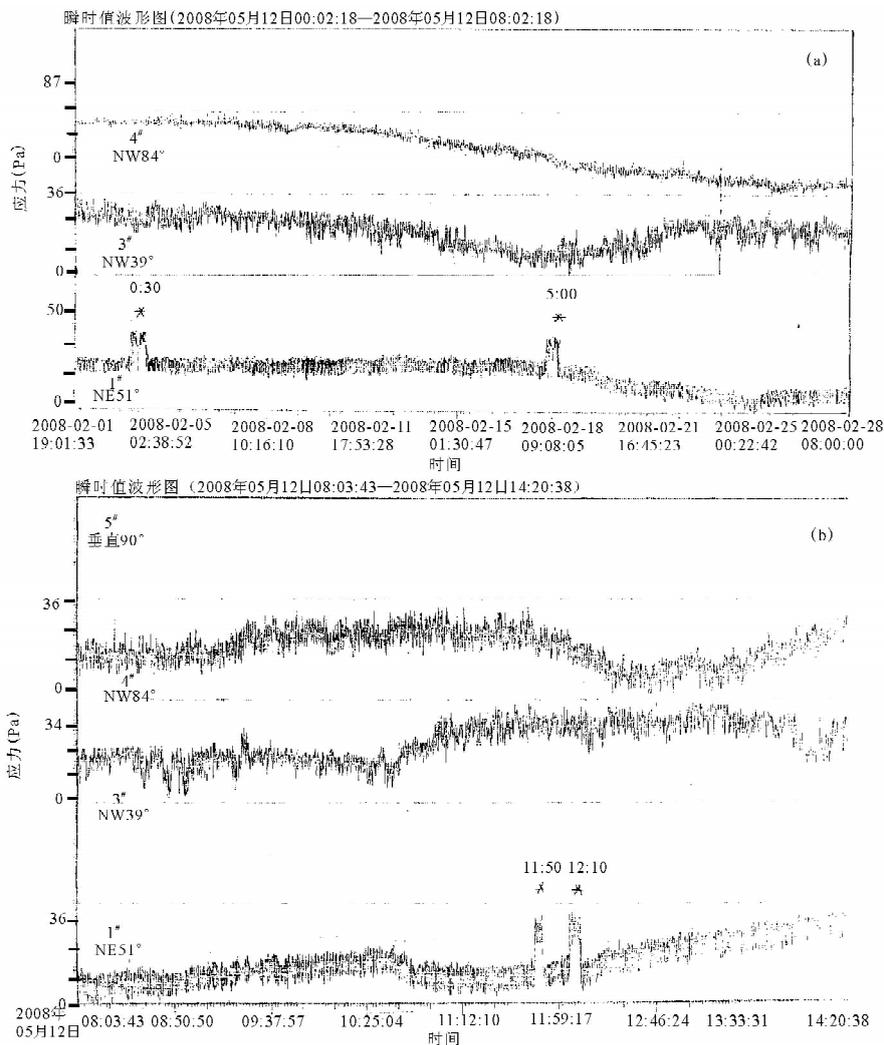


图 6 汶川 8 级大地震地应力跳动异常图

Fig. 6 Mutation abnormality map of earth stress in  $M_S$  8.0 Wenchuan earthquake

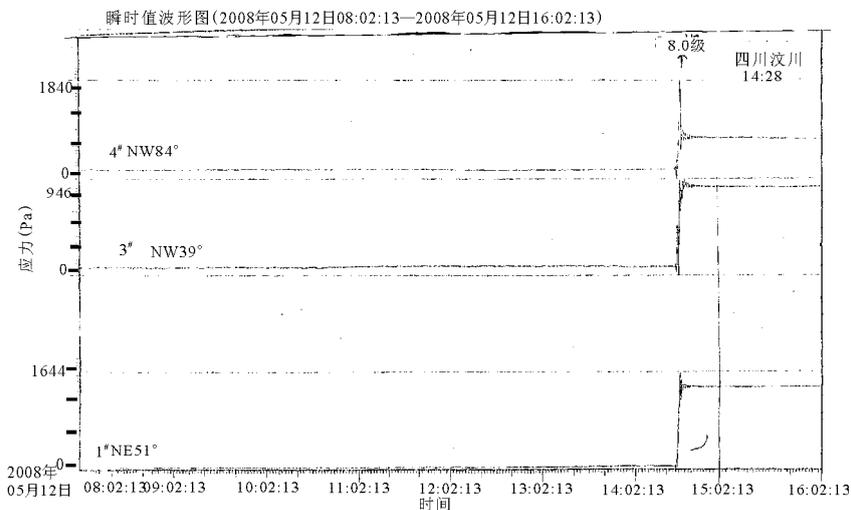


图 7 汶川 8 级大地震地震波图

Fig. 7 Seismic wave map in  $M_S$  8.0 Wenchuan earthquake

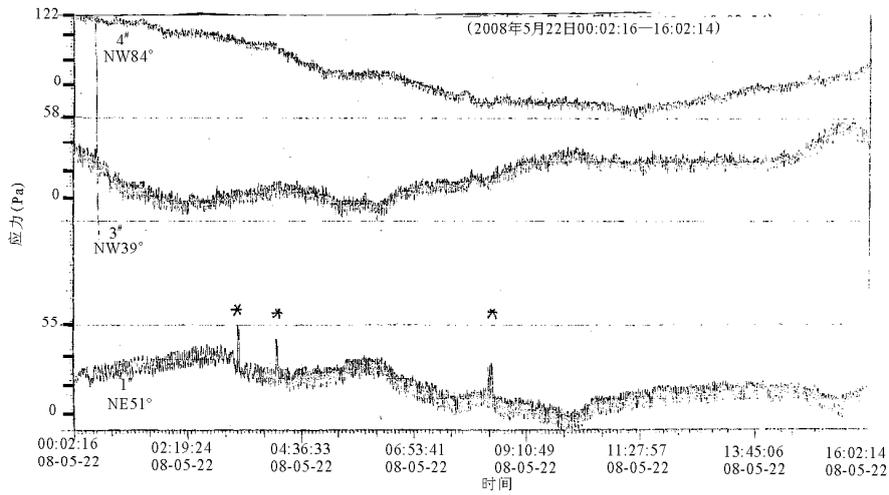


图 8 四川青川 6.4 级地震前太原中辐院台地应力跳动异常图

Fig. 8 Mutation abnormality map of earth stress before  $M_s$  6.4 Qingchuan earthquake, in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

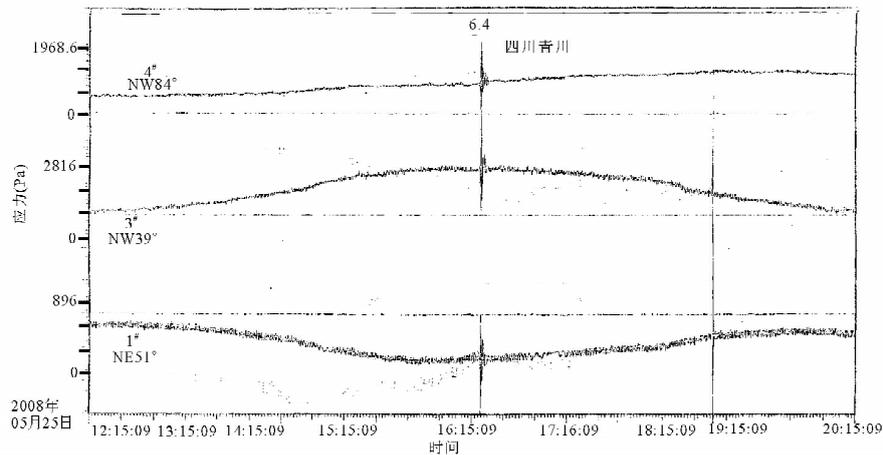


图 9 太原中辐院台记录的四川青川 6.4 级地震波图

Fig. 9 Seismic wave map in  $M_s$  6.4 Qingchuan earthquake in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

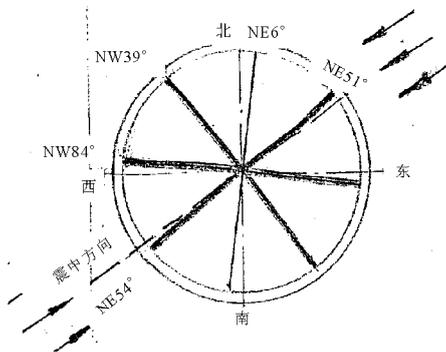


图 10 青川 6.4 级地震地应力传感器受力分析图  
Fig. 10 Pressure analysis map of the ground stress sensor in  $M_s$  6.4 Qingchuan earthquake

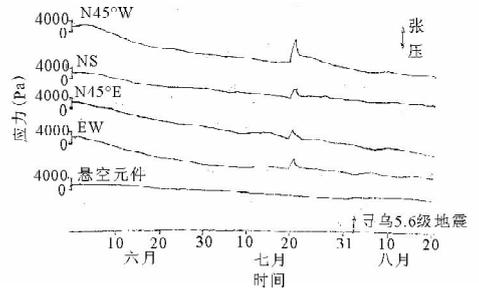


图 11 福建莆田地震台记录的江西省寻乌 5.6 级地震速率异常图  
Fig. 11 Velocity abnormality map of the  $M_s$  5.6 Xunwu earthquake in Jiangxi recorded by Putian seismic station, Fujian Province

式中： $\omega$  为最大主应力方向到第一号元件方向的夹角，这里  $s_i = \frac{L_{2i} - L_{1i}}{K_i}$ 。（ $i = 1, 2, 3$ ）为记录应力值，其中  $L_i$  和  $K_i$  分别为所测元件的电感变化值和应力灵敏系数。根据速率异常计算 4 组主应力方向与地震的关系。

压磁地应力四分向探头 4 个元件中任 3 个为一组（共 4 组），如果每组测值算出平面应力状态相同，

就可以证明测到地应力了。表 2 中 4 组最小主应力方向结果相差很小，它和震中方向基本一致。按测量原理可用一个简单的计算式  $S_1 + S_3 = S_2 + S_4$  来验证，表一中  $S_1、S_3$  之和与  $S_2、S_4$  之和相差 12 帕，说明该测量系统测到的地应力是可信的。悬空元件自从安装后，一直保持平稳，当受力元件有异常变化时，悬空元件测量值仍然保持平稳。

表 2 计算 4 组最小主应力方向的互检结果

Table 2 The results of each seizure of calculated 4 minimum principal stress directions

台名	异常时间段	元件组合	最小主应力方向	地震				
				震中	震前	震级	震中距	震中方向
福建莆田	1987 年 7 月 20 日 10:00 至 22:00	1,2,3	NE82°42'	江西寻乌	1987 年 8 月 2 日	5.6	330 km	NE83°
		2,3,4	NE82°33'					
		3,4,1	NE82°12'					
		4,1,2	NE82°36'					

表 3 河北张家口 6.2 级地震前太原晋祠台（岩孔）与中辐院台（土孔）应力前兆异常对比表

Table 3 Correlation table of stress precursor abnormality in  $M_s$  6.2 Zhangjiakou earthquake in Hebei Province recorded by Jinci seismic station, Taiyuan, Shanxi Province and the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

地震			异常				
震中	震时	震级	台名	震中方向	时间段	形式	主应力方向
张家口	1998 年 1 月 10 日 12:25	6.2	晋祠台	N35°E	10 日 6:00—10:00	突跳	N30°E 元件
			中辐院台	N34°E	10 日 2:00—2:20	速率 1# 40 ↑ 2# 30 ↓ 3# 340 ↑ 4# 50 ↑	N40°E

### 3.2 相距较远的两个岩孔应力台，对应同一个地震的应力前兆异常

1986 年 11 月 15 日 15 时 24 分，我国台湾省花莲东南海中发生 6.2 级地震，距离震中 360 km 的莆田地震台震前 1 小时 39 分，NE45°元件发生了应力 -1143 帕的应力突跳，而距离震中 880 km 的广州五山地震台的 NE45°元件，震前 1 小时 14 分同样发生应力 -714 帕的应力突跳，离震中近的莆田台前兆异常出现时间早，复原时间晚，广州五山台离震中远，异常出现较晚，复原时间较早（张培耀等，1991；图 12）。

### 3.3 相距较近的土层，岩层应力台，对应同一个地震的应力前兆异常

1998 年 1 月 10 日 12 时半，在河北张家口发生 6.2 级地震，震前离震中 450 km 的中辐院台在 1:30 时跳变，计算最大主应力方向为 NE40°，而离震中 410 km 的太原晋祠台 6 时，在 NE30°元件发生跳跃异常，两台最大主应力方向都指向震中（如图 13、14 所示）。

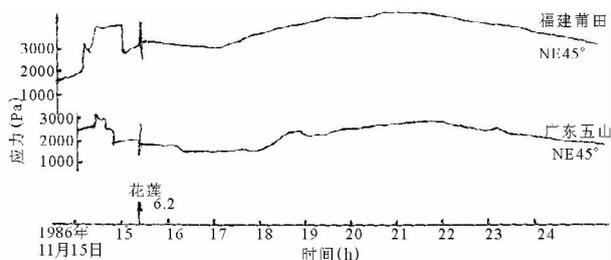


图 12 福建莆田和广州五山地震台记录到我国台湾省花莲东南海中发生 6.2 级地震应力异常  
Fig. 12 Stress abnormality map in  $M_s$  6.2 SN Hualian earthquake, Taiwan recorded by Putian seismic station, Fujian Province and Wushan seismic station, Guangzhou, Guangdong Province

### 3.4 测量系统的灵敏度

压磁频率应力测量系统灵敏度为 50~200Pa（应变为  $10^{-8} \sim 10^{-9}$ ）下面是地震台记录到固体潮曲线，该系统还能记录到远距离地震的前兆及地震波图。（如图 15,16,17 所示）

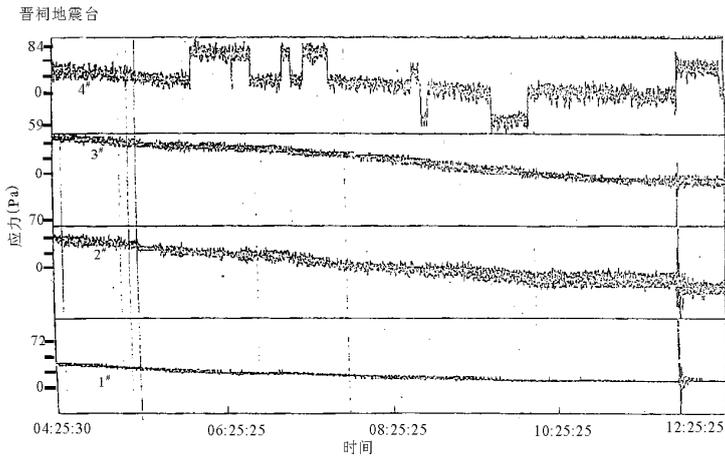


图 13 太原晋祠台记录河北张家口 6.2 级地震跳变异常

Fig. 13 Mutation abnormality map in  $M_s$  6.2 Zhangjiakou earthquake in Hebei Province recorded by Jinci seismic station, Taiyuan, Shanxi Province

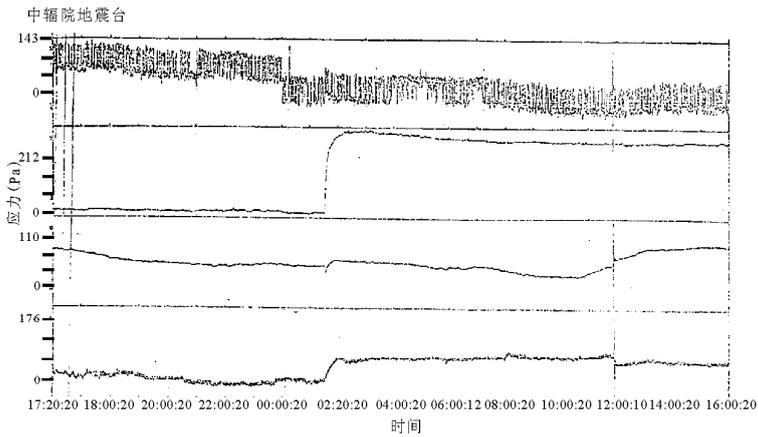


图 14 中辐院台记录河北张家口 6.2 级地震跳变异常

Fig. 14 Mutation abnormality map in  $M_s$  6.2 Zhangjiakou earthquake in Hebei Province recorded by the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

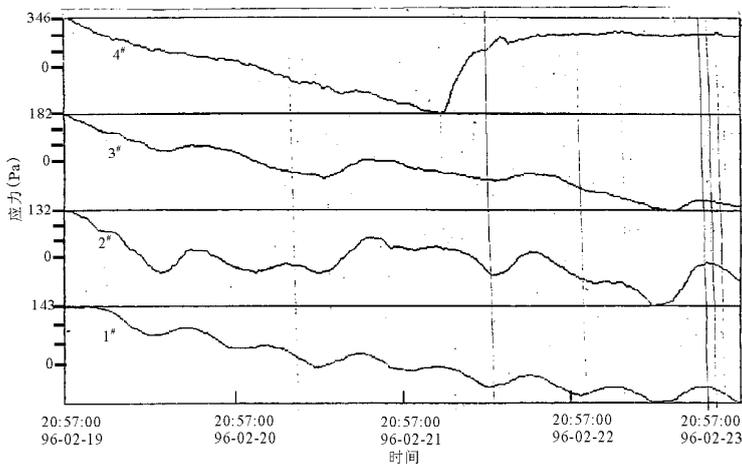


图 15 太原晋祠压磁频率地应力系统记录固体潮曲线

Fig. 15 Solid tide curve recorded by the earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency in Jinci seismic station, Taiyuan, Shanxi Province

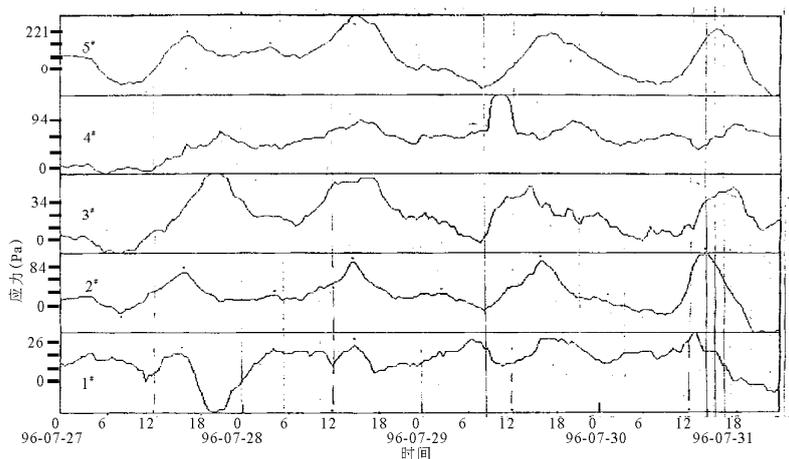


图 16 中辐院台压磁频率地应力系统记录固体潮曲线

Fig. 16 Solid tide curve recorded by the earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

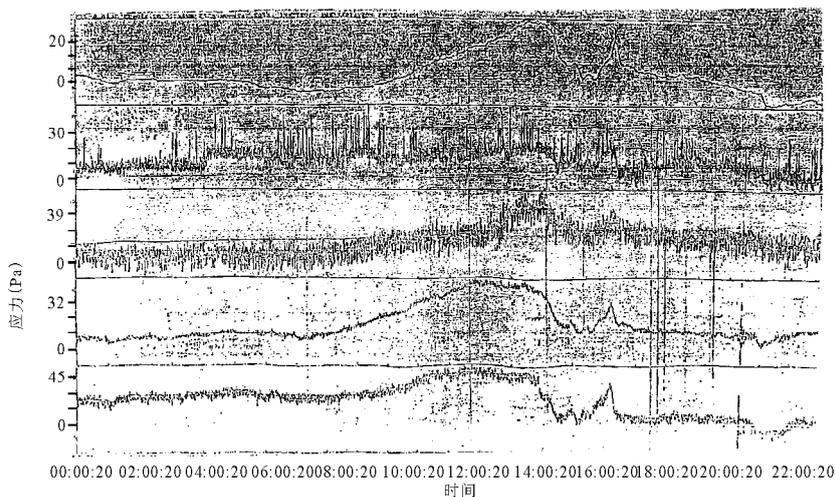


图 17 中辐院台压磁频率地应力仪记录到俄罗斯萨哈林岛 7.5 级地震前兆及地震波图

Fig. 17 Seismic wave and precursor abnormality map in  $M_s 7.5$  Sahalin island earthquake of Russia recorded by the earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency in the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

## 4 预报效果

### 4.1 江西寻乌 5.6 级地震

1987 年 8 月 2 日 17 时 07 分,在江西寻乌发生了一次 5.6 级地震,在震前的 7 月 20 日,福建省莆田地震台记录到震前应力变化异常,4 个元件两天应力值为 12~20 kPa(图 11),经计算最小主应力方向为 NE83°,莆田地震台 7 月 25 日向省地震台发出预测意见,“未来 10 天,在莆田台的东方向上,将发生 6 级左右的地震”,时间、震级及方向皆与地震发生情况相符,震中距为 330 km,方向为 NE83°。

### 4.2 山西榆次市 3.5 级地震

1991 年 6 月 19 日,中辐院台根据地下 4 个压

磁元件跳变异常(图 18),向太原市地震局,山西省地震局发出预报意见:“压磁频率式土层应力仪应力异常报告(ZP 91001 号)预计在未来 10 天内,在太原南效一带,将发生 3~4 级地震”,结果在“1991 年 6 月 28 日 19 时 17 分,在山西榆次市郭家堡乡发生 3.5 级地震(张道仪等,1994)。”

### 4.3 山西榆次市 4.2 级地震

1991 年 10 月 28 日,中辐院台根据地下 4 个压磁元件突变异常(图 19),向太原市地震局,山西省地震局发出预报意见,“压磁频率式土层应力仪异常报告(ZP91002 号),预测在 11 月 10 日左右,在榆次一带可能发生 4 级左右地震或远处 5 级以上地震”,

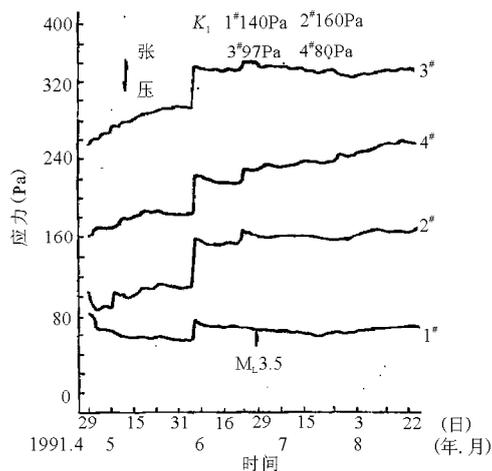


图 18 中辐院台记录山西榆次市 3.5 级地震前速率异常图

Fig. 18 Velocity abnormality map before  $M_s$  3.5 Yuci earthquake in Shanxi Province recorded by the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

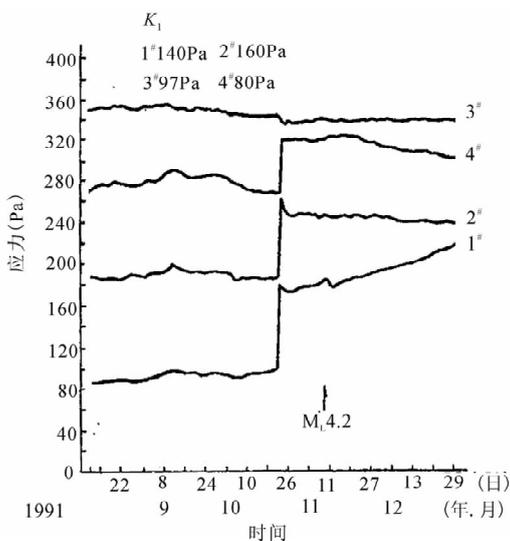


图 19 中辐院台记录山西榆次市 4.2 级震前速率异常图

Fig. 19 Velocity abnormality map before  $M_s$  4.2 Yuci earthquake in Shanxi Province recorded by the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

结果在“1991年11月9日13时14分,在榆次市张庆乡发生了4.2级地震”,预测意见与地震结果在地点、震级、时间上完全一致。

#### 4.4 太原市南郊 4.8 级地震

1993年5月10日,中辐院台根据地下5个压磁元件跳变异常(图20),向太原地震局,山西省地震局发出预报意见,“中辐院地应力台应力异常报告(ZY 9301号),预测在1993年5月24日前后,在榆

次及太原南郊带,可能发生4级左右地震,结果在1993年6月26日22时36分在太原市北格镇一榆次市张庆乡一带,发生4.8级地震”。预测意见与地震结果在地点、震级上完全相符,时间上有差异。但临震前垂直元件出现跳跃异常(图21)马上向地震局作补充意见,结果地点、震级、时间都相符。

以上3次比较成功的预报,获得中国核工业总公司部级科技进步奖。表4为三个地应力地震台短临地震预报震例。

从表4中可以看到应力异常的范围从0.02 kPa到124 kPa,测量范围在5个数量级,灵敏度为几十帕,可见只有高灵敏度,量程强的高精度应力仪才能很好地捕捉到短临地震前兆信息。中辐院台应力传感器安装在粘土层中,它和传感器装在岩层一样,能获取短临地震前兆信息,并且还测量到快速变化的地震面波,这为高精度应力仪在广大平原地区使用开阔了广泛的前景。

## 5 讨论和结论

### 5.1 测量系统的应用效果

(1) 压磁频率应力测量系统记录地应力异常资料可以对预测地震震级、震中位置、发震时间提供可靠依据。因为本系统抗干扰能力强,并具有良好动态性能、高灵敏度及稳定性的特点,在应用中才能准确反映地下测区应力积累和加强的全过程。四川汶川8级地震前记录到地应力趋势、速率、临震异常,大大提高地震预报的准确度。中辐院台压磁频率地应力测量系统对太原地区3.5级以上地震、1500 km处的6.5级地震、2000~3000 km处的7级以上地震,仪器皆记录到地震面波。

(2) 提高元件灵敏度系数及稳定性,主要解决好传感器制作工艺及井下安装质量,才能得到可靠的观测资料,才能使得悬空元件保持平稳,才能做到4个元件间测值的互检,增加了测量结果的可靠性。

(3) 压磁频率应力传感器在仪器结构、与岩石的耦合技术、元件绝缘工艺及井下安装工艺等方面有了很大改进,大大提高了仪器安装的成功率,降低了对钻孔的技术要求,降低了成本,延长了传感器的观测寿命。

### 5.2 测量系统的缺陷及解决办法

测量系统在运转过程中不能断电,否则测量资料在连接处出现台阶,为了解决这个问题,在仪器里面配备了蓄电池,在断电的情况下可连续工作8小时。

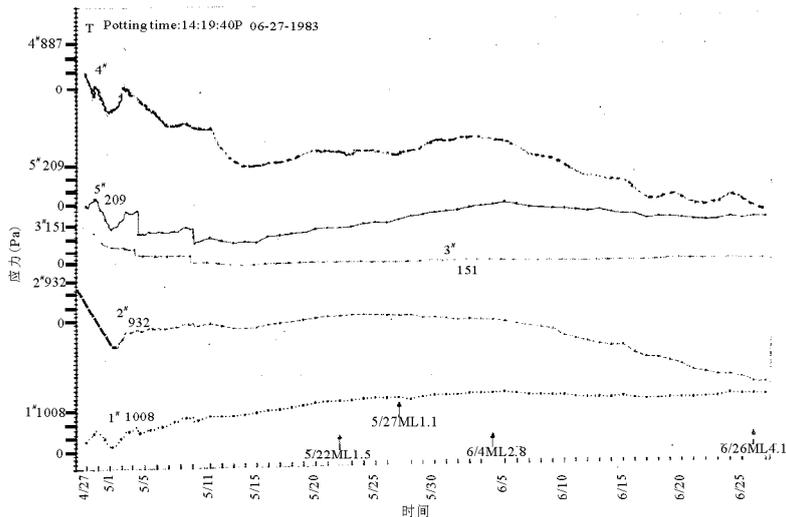


图 20 中辐院台记录太原市南郊 4.8 级地震临震前速率异常图

Fig. 20 Velocity anomaly map before  $M_s$  4.8 Taiyuan earthquake in Shanxi Province recorded by the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

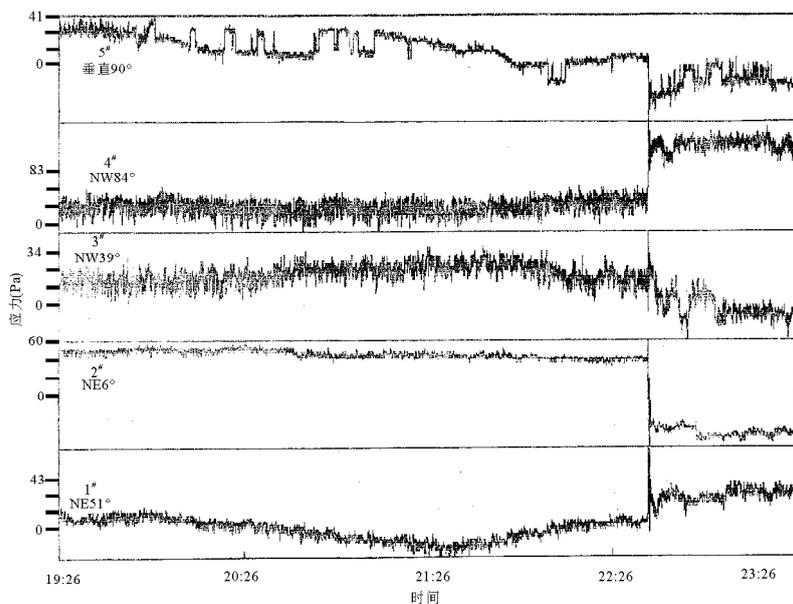


图 21 中辐院台记录太原市南郊 4.8 级地震临震前垂直元件跳跃异常及地震波图

Fig. 21 Seismic wave and vertical components mutation abnormality map before  $M_s$  4.8 Taiyuan earthquake in Shanxi Province recorded by the seismic station of Chinese Academy of Radiation and Protection

表 4 短临地震预报震例

Table 4 cases of short-term earthquake prediction

台站	应力异常			地震			震中距 (km)	预报情况
	时间	主应力	方向	时间	震级	震中		
福建莆田	1987 年 7 月 20 日	28(kPa)	NE83°	1987 年 8 月 2 日	5.6	江西寻乌	330	报对时间、震级、方向
福建莆田	1987 年 5 月 19 日	3.1(kPa)	NE8°	1987 年 6 月 1 日	3.4	福建泉州	68	报对震级、方向
太原中辐院	1991 年 6 月 6 日	4.2(kPa)	NW52°	1991 年 6 月 28 日	3.5	山西榆次	20	报对三要素
太原中辐院	1991 年 10 月 22 日	9.6(kPa)	NW48°	1991 年 11 月 9 日	4.2	山西榆次	18	报对三要素
太原中辐院	1993 年 5 月 4 日	4.8(kPa)	NW61°	1993 年 6 月 26 日	4.8	太原南郊	12	报对地点、震级
太原中辐院	1993 年 6 月 23 日	0.02(kPa)	垂直	1993 年 6 月 26 日	4.8	太原南郊	12	报对三要素(临震)
太原	1991 年 1 月 24 日	124(kPa)	NS	1991 年 3 月 26 日	5.8	山西大同	290	报对地点、震级
太原	1987 年 1 月 26 日	12(kPa)	NS	1991 年 1 月 29 日	5.1	山西忻州	85	报对方向、震级

### 5.3 测量系统应用前景

测量系统在土层应用中所观测的资料与岩层资料一样,都能起到预报地震的效果。解决了传感器在岩性完整或破碎情况下高质量地完成井下安装问题,使测量系统在山地、广大平原地区有了广泛的使用前景。

### 参 考 文 献

- 李四光. 1973. 地震地质. 科学出版社.
- 李勇, 周荣军, 董顺利, 张毅, 何玉林, 陈浩, 闫亮, 乔宝成, 马博琳. 2008. 汶川地震的地表破裂与逆冲—走滑作用. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 404~413.
- 李忠权, 应丹琳, 郭晓玉, 李洪奎, 王麒麟, 尤东华, 王雪峰, 陈骁, 陈敏. 2008. 龙门山汶川地震特征及构造运动学初析. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 429~430.
- 刘树根, 田小彬, 李智武, 孙玮, 郭兵, 刘顺. 2008. 龙门山中段构造特征与汶川地震. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 388~397.
- 杨主恩, 邓志辉, 马文涛, 孙谦, 陈桂华. 2008. 汶川 8 级强震极震

- 区破坏情况与烈度. 地震地质, 30(2): 349~354.
- 张道仪, 延军, 张培耀, 孙国学, 徐玉荣. 1990. 地震前地应力短临异常初探. 地震, (1): 43~49.
- 张道仪, 延军, 胡遵素, 朱万宁, 孙国学. 1994. 高精度岩层应力仪探头安装在土层中的实验观测. 地震, (2): 81~84.
- 张培耀, 张翠菊. 1991. II 型压磁应力仪介绍. 地震, (4): 73~75.
- 张培耀, 张翠菊. 1992. 压磁应力测量中悬空元件变化的原因. 地震, (3): 62~65, 78.
- 张岳桥, 董树文. 2008. 四川汶川  $M_s$  8.0 地震报道. 地质学报, 82(7): 1013~1016.
- 朱介寿. 2008. 汶川地震的岩石圈深部结构与动力学背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 35(4): 348~356.
- Doong Shuwen, Zhang Yueqiao, Wu Zhenhan, Yang Yong, Ma Yinsheng, Shi Wei, Chen Zhengle, Long Changxing, An Meijuan. 2008. Surface rupture and co-seismic displacement produced by the  $M_s$  8.0 Wenchuan earthquake of May 12<sup>th</sup>, 2008, Sichuan, China: Eastwards growth of the Qinghai-Tibet plateau. Acta Geologica Sinica(English Edition), 82(5): 938~948.

## Anomalous Earth Stress of the $M_s$ 8 Wenchuan Earthquake in Sichuan, China ——Recording from Piezomagnetic Frequency Measurement to the Earth Stress

ZHANG Peiyao<sup>1)</sup>, ZHANG Daoyi<sup>2)</sup>, ZHU Wanning<sup>2)</sup>, FAN Lianglong<sup>1)</sup>, CHEN Ruoping<sup>2)</sup>, YAN Jun<sup>2)</sup>

1) *The Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing, 100085;*

2) *Chinese Institute for Radiation Protection, Taiyuan, Shanxi, 030006*

### Abstract

When the  $M_s$  8 earthquake occurred in Wenchuan County of Sichuan on 12 May 2008, our piezomagnetic frequency measurement system about 1000 km away from the focus recorded the world-shaking natural disaster. Ninety days before the earthquake, the earth stress changed in a great magnitude, being indicative of the earthquake. Three mechanical components received 633.5 Pa, 1512 Pa and 4561.4 Pa, respectively. A few hours before the earthquake, the component directing the focus presented four pulsive anomalies immediately following the great earthquake. The platform can at the China Academy of Radiation and Protection Research, which is more than 1000 km far away from the focus, recorded the process of energy accumulation and surface deformation before the earthquake. This verifies the idea that the same stress state can be collected to a large extent at different sites of different faulting zones. This system is of high sensitivity, good performances and anti-interference ability, all these overcome disturb factors of this system employing pressure, resistance and inductance. The piezomagnetic frequency stress measurement system, which is not only installed on rocks of mountains but also in plain, is used to monitor rapidly-changing S wave and acquire boding information of earthquake so as to achieve the goal of forecasting earthquake. Therefore, the system of this kind will be of promising application.

**Key words:**  $M_s$  8 earthquakes; anomalous earth stress; the earth stress measuring system of digital piezomagnetic frequency; earthquake forecast; Wenchuan; Sichuan