

# 河津 4.8 级地震前山西临汾台倾斜前驱波特征分析\*

李 艳<sup>1,2</sup>, 高振强<sup>2,3</sup>, 程冬焱<sup>2,4</sup>, 张仰辉<sup>1,2</sup>, 李 军<sup>1,2</sup>

(1. 山西省地震局 临汾中心地震台, 山西 临汾 041000; 2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 山西 太原 030025;  
3. 山西省地震局 夏县中心地震台, 山西 夏县 044400; 4. 山西省地震局, 山西 太原 030021)

**摘要:** 采用临汾台 SSQ-2I 型石英摆和 VP 型宽带垂直摆倾斜仪观测资料, 运用原始形态曲线方法, 对 2010 年 1 月 24 日山西河津 4.8 级地震前观测曲线进行分析。结果表明: 在震前两种观测手段都记录到明显的前驱波, 其形态特征与岩石力学中的粘滑事件非常相似, 应是此次地震前显著的短临异常信息, 同时给出了产生慢粘滑现象的机理解释。

**关键词:** 河津 4.8 级地震; 倾斜仪; 前驱波; 慢粘滑; 短临异常

**中图分类号:** P315.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2013)02-0160-05

## 0 引言

20 世纪 70 年代, 金森博雄报道了 1960 年 5 月 22 日智利 8.3 级地震前 15 min, 在相距上万千米的帕萨迪纳地震台的长周期地震仪记录中发现 300~600 s 的长周期波, 他将其称之为“前驱波”, 也有人称之为“前兆波”、“异常脉动”、“蠕动波”、“形变波”、“应力波”、“静地震”等(高金哲等, 2005); 近 10 年来有关前驱波的研究越来越多, 涉及到的前兆观测手段主要有定点形变(倾斜、应变)、地下水位、重力、地震脉动等, 但所报道的地震事件大多以上千千米的远震为主(李冬梅等, 2002; 张淑亮, 范雪芳, 2003; 陈德福, 2006; 尹亮等, 2010; 2011; 陈双贵等, 2011), 主要反映的是“远场兆效应”, 相对来说, 与近震有关的前驱波研究报道比较少。

本文对 2010 年 1 月 24 日山西河津 4.8 级地震前临汾台倾斜资料分析, 发现 SSQ-2I 型石英摆和 VP 型宽带垂直摆在震前 1~3 个月出现显著的扰动现象, 其形态特征不同于该手段以往记录到的远强震前驱波图像, 而是与岩石力学中的粘滑事件非常相似, 同时对其成因机理及震源过程进行了分析讨论。

## 1 概况

临汾地震台地处临汾盆地西缘, 构造上位于临汾凹陷内的龙祠沉降中心, 其中心紧靠控制盆地西缘的罗云山山前断裂, 断裂从临汾台附近通过。临汾台的西面为断层下盘, 其岩性以奥陶系中统灰岩为主, 其东面是断层的上盘, 上覆盖第四系上更新黄土, 台站的地势表现为自西向东倾斜, 东部为晚更新世和全新世河流相堆积广泛分布, 沟谷切割轻微。形变观测山洞位于临汾台西面的山梁上, 山体为奥陶系中统马家沟组灰岩, 岩石质地单一, 岩层以中厚层为主, 距洞室约 150 m 处罗云山断裂从山前通过, 该断层为 N40°E 走向、倾向 SE 的正断层。山洞建造于 1978 年, 洞体覆盖厚度为 32~40 m, 洞内年温差小于 0.3℃, 摆体仪器墩是凿山洞时所建, 墩体稳定性非常好, 观测条件符合洞体形变规范要求。

SSQ-2I 型石英摆倾斜仪(以下简称石英摆)是“十五”项目新增仪器, 安装于 2005 年, 自 2008 年起进入正式运行, 运行以来仪器工作状况稳定; VP 型宽带垂直摆倾斜仪(以下简称宽带摆)是武汉地震仪器研究院研制的新型仪器, 由于电路设计使用了新技术, 使得该仪器测量频带宽度为 DC~0.5 Hz, 比同类仪器大 20 倍, 同时记录地震的幅度也比同类仪器大 10~20 倍(马武刚

\* 收稿日期: 2012-04-06.

基金项目: 2011 年山西省地震局科研项目(SBK-1118)、山西省自然科学基金(2011011027)和山西省科技攻关项目(2006031106)联合资助。

等, 2010), 宽带摆于2008年8月底安装, 2套倾斜仪分别安装在观测山洞内2个不同的洞室中。

## 2 前驱波典型特征分析

### 2.1 远震前驱波特征

2008至2009年3月, 全球共发生 $M \geq 7.0$ 地震24次, 其中12次地震前石英摆都记录到前驱波现象, 这在同类型仪器或其它观测手段中是少见的, 波形图以“阶跃、连续脉冲状突跳、脉动加粗”等畸变形态为主, 出现时间一般在大震前数小时至7天左右(高振强等, 2009)。图1列出了2008年临汾台记录到的3次7级以上地震的SN分量远震前驱波特征图。在2008年5月12日汶川8.0级地震前两天, 石英摆SN曲线连续出现数次幅度约1 ms的阶跃形态, 震前1天即5月11日阶跃现象消失, 但曲线脉动出现显著增粗且伴有“毛刺”现象(图1c)。

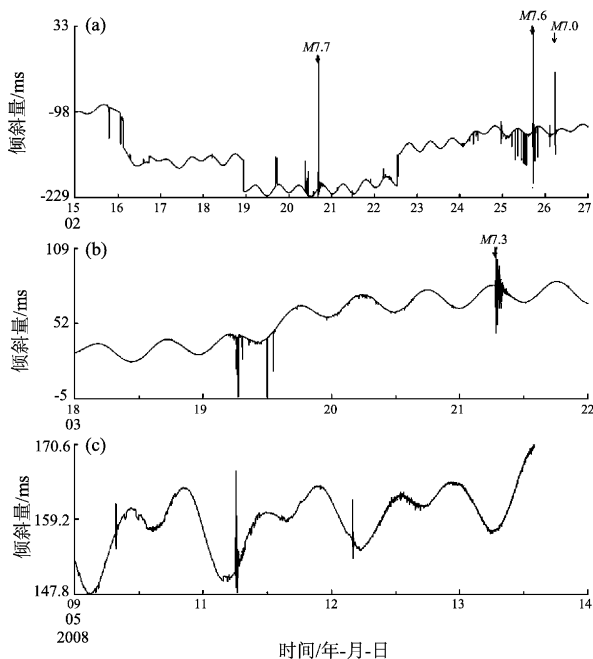


图1 临汾台石英摆SN分量远震前驱波形态特征  
(a) 2008年2月20日~26日苏门答腊3次7级地震;  
(b) 2008年3月21日新疆于田7.3级地震;  
(c) 2008年5月12日汶川8.0级地震  
Fig. 1 Precursor wave morphological characteristics recorded by quartz horizontal pendulum in SN component before the distant earthquake at Linfen Station

(a) three Sumatra  $M7$  earthquakes from Feb. 20 to Feb. 26 in 2008; (b) Yutian  $M7.3$  earthquake in Xinjiang on Mar. 21 in 2008; (c) Wenchuan  $M8.0$  earthquake on May. 12 in 2008

### 2.2 河津地震前驱波特征分析

自2009年3月28日原平4.2级地震以来, 汾渭地震带(也有学者称为山西地震带)又连续发生2009年11月5日陕西高陵4.4级、2010年1月24日河津4.8级、4月4日大同4.5级、6月5日太原阳曲4.6级等地震, 其中陕西高陵、河津位于汾渭地震带的南部地区, 分别距临汾台265 km和89 km。

石英摆SN分量在2009年10月9日开始记录到连续性的脉动加粗、毛刺等异常信号扰动现象, 在11~13日这种扰动演变为幕式阶跃、错动及幕式尖脉冲事件, 且每一幕的扰动时间并不完全相同, 扰动事件过程为几分钟至几十分钟不等(图2), 该类型异常信号与以前记录的远震前驱波阶变、连续性脉动变粗、突跳等形态完全不同, 而是与脆性岩石力学实验中的粘滑信号(伴随声发射)变化特征非常类似(马胜利等, 2008)(图3), 故称其为间歇性的幕式慢粘滑事件, 这与图1中远震前驱波的形态有很大差异。

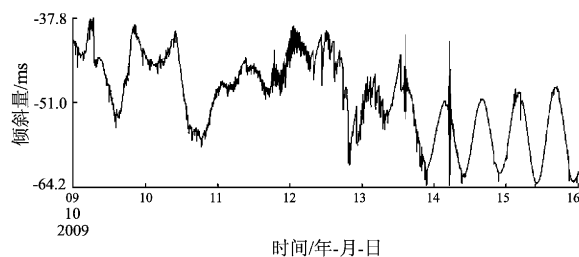


图2 2009年10月石英摆SN分量记录的慢粘滑事件  
Fig. 2 The slow viscous slip curve in SN component recorded by quartz horizontal pendulum at Linfen Station on Oct., 2009

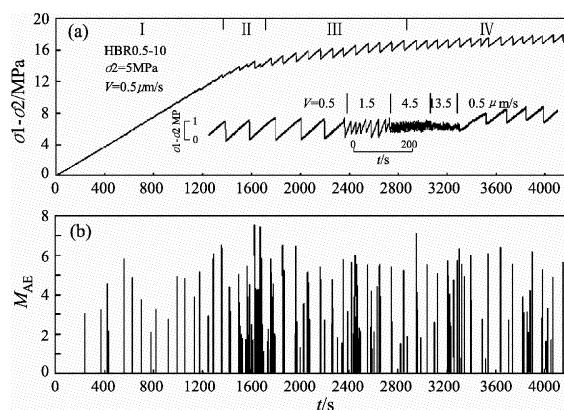


图3 脆性岩石力学实验中的幕式粘滑事件  
(据马胜利等(2008))

Fig. 3 The curtain type of viscous slip event in brittle rock mechanics experiment (by Ma et al (2008))

2009 年 10 月 14 日以后石英摆 SN 分量固体潮曲线由以往背景光滑的形态变为脉动变粗、毛刺增多等畸变现象, 11 月 5 日在陕西高陵发生了 4.4 级地震 (震中距 265 km), 地震后畸变现象依然存在 (图 4); 1 个月后即 2010 年 1 月曲线畸变现象更加突出, 主要表现为 1 月 7 日以后脉动变粗、毛刺增多等扰动现象愈发明显, 11 日曲线又出现快速北倾变化, 至 13 日北倾幅度约 150 ms, 14 日以后转为缓慢南倾变化, 期间在 9~15 日伴有明显的向下脉冲突跳变化, 19 日始南倾速率加快, 固体潮形态消失, 24 日发生河津 4.8 级地震 (图 5), 同震阶变幅度很小, 地震后曲线恢复正常 (固体潮形态光滑、清晰)。因此, 上述的慢粘滑及脉动变粗、毛刺增多等前驱波扰动应是河津地震的短临异常信号。

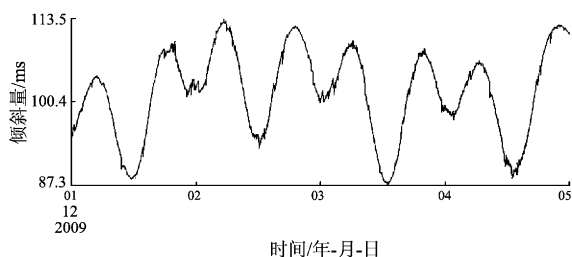


图 4 2009 年 12 月石英摆 SN 分量固体潮畸变形态

Fig. 4 The solid tide distortion morphology in SN component recorded by quartz horizontal pendulum on Dec. , 2009

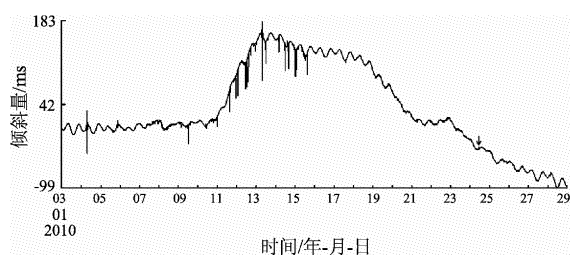


图 5 石英摆 SN 分量观测曲线

Fig. 5 The observation curve in SN component recorded by quartz horizontal pendulum on Jan. , 2010

宽带摆 SN 分量在河津地震前后也出现了类似图 2 中粘滑形态的变化图像, 具体过程是自 2009 年 12 月 21 日开始连续出现幕式错动及幕式尖脉冲事件, 错动方向为北向 (向上), 错动阶跃幅度最大为 25 ms, 24 日记录到河津地震波, 且产生北向

同震阶变, 幅度达 84 ms, 每日错动 3~7 次, 4.8 级地震后错位现象持续了 7 天左右消失 (图 6), 2010 年 2 月初曲线恢复正常, 与石英摆出现的粘滑形态相比 (图 3), 宽带摆的粘滑特征更加明显, 持续时间更长 (持续约 50 天), 这可能与两仪器不同的工作周期、频带响应等参数有关。

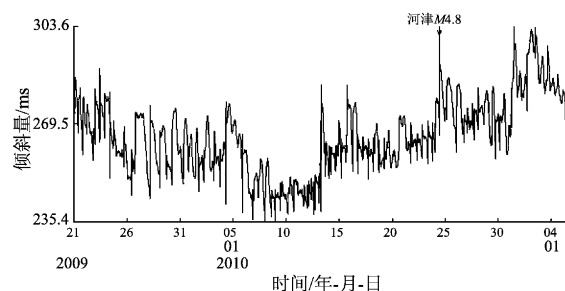


图 6 宽带摆 SN 分量记录的慢粘滑事件

Fig. 6 The slow viscous slip curve in SN component recorded by broadband pendulum

考虑到宽频带倾斜仪“宽频” (DC~0.5 Hz) 以及高采样率 (秒) 的优势, 笔者又对粘滑事件每日的秒数据进行了详细分析, 经过逐日排查, 发现在河津 4.8 级地震前 1 h, 光滑的曲线出现了幅度约 1 ms、周期为 1 min 的南向 (向下) 脉冲状变化 (图 7), 3 min 后再次出现幅度为 1 ms 的南向 (向下) 变化, 而临汾台的水平摆、垂直摆及侯马台水管倾斜观测等在同时段均未有此类似形态的图像, 这也许是宽带摆“发现的”临震异常信号 (图 7)。

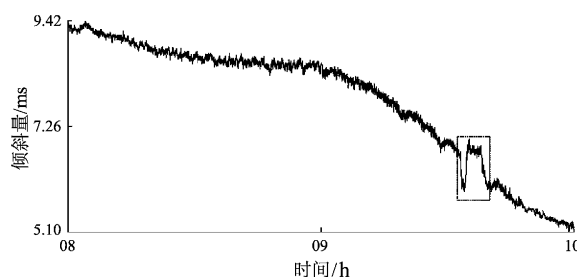


图 7 河津 4.8 级地震前 2 h 宽带摆 SN 分量秒数据记录曲线

Fig. 7 The second data curve in SN component recorded by broadband pendulum at two hours before Hejin M4.8 earthquake

2010 年 1 月河津地震后, 汾渭带中北部于 4 月、6 月分别发生了大同阳高 4.5 级及阳曲 4.6 级

地震,前者震中距临汾台490 km,可能是距离较远的原因,临汾台两倾斜仪并未记录到明显异常,而在阳曲地震前则均记到了小幅度的阶跃、脉动增粗等畸变现象(高振强等,2010),但这些异常形态均不是图2、图6中的慢粘滑图像特征。

笔者对近几年石英摆记录曲线统计,发现只要该测项出现阶跃扰动(突跳)、脉动增粗等前驱波图像之后,往往可能有7级左右的远大地震事件发生,但并不是每次大震前都有前驱波现象。根据台站制定的异常落实方案,每当异常出现后观测人员都认真进行观测场地环境实地调查、及时查看仪器工作状态、核对仪器各项工作参数的正确性等检查措施,必要时对仪器进行标定,当排除仪器自身及观测环境等可能的干扰因素后,可认定为地震前驱波现象。

### 3 幕式错动的机理解释

幕式慢粘滑和脉动变粗、毛刺突跳等现象均属于前驱波现象。脆性岩石力学实验结果证实,伴随声发射的幕式粘滑事件实际上是岩石宏观大破裂前的微破裂,多个幕式发生的微破裂丛集成核最终导致岩石的宏观快速破裂。王贤仁和卢艳清(2002)曾根据云南地倾斜观测资料推测认为,震前一段时间的幕式阶变错动事件很可能就是岩石的微破裂及粘滑现象,是大震前有效的前兆,但从图2、6所示的错动事件来看,其并不具粘滑事件快速破裂(持续时间很短)的特征,并不完全支持幕式慢粘滑事件全部来自断层脆性段微破裂粘滑的成因机理;曾融生(2005)根据对地壳和上地幔的分层结构,提出地壳脆性层应力分布与地震断层存在应力的相互作用,但许多现象说明塑性层可能是地震发生的策源地,由此,上述错动的慢粘滑事件可能部分来自脆性层、部分来自塑性层,两者围绕刚性的地震硬核(孕震体)分布,并最终导致地震核(孕震体)的脆性破裂发震。而脉动变粗、毛刺突跳等扰动形成的机理可能是时间上密集发生的幕式慢粘滑事件相互叠加,形成准连续性的扰动信号。

孕震体破裂前,大量介质破裂及裂隙间粘滑产生的应力降使震源区内应变场进行调整应力降以应力波的形式向四周传递,位于河津震中北部的临汾台两套倾斜仪以阶跃、突跳等形式记录到

了粘滑、错动后的变形阶段,而且均是在SN分量上记到的,说明扰动具有明显的方向性特征;河津4.8级主震后宽带摆幕式粘滑现象并未立即消失,说明孕震体破裂并不能完全释放所有能量,仍有一部分是以多种形式缓慢释放的(如慢地震),因此,地震后依旧会出现粘滑、扰动现象。

### 4 结论与讨论

(1) 河津地震前临汾台石英摆和宽带摆记录到了典型的幕式慢粘滑事件(错动、连续阶跃),完全不同于远震的前驱波形态,而是与脆性岩石力学实验中的粘滑信号(伴随声发射)变化特征非常类似;其中石英摆还伴有突跳、脉动变粗、毛刺增多等连续性的扰动变化。

(2) 慢粘滑及其扰动事件在仪器记录上具有明确的方向性,这对判定未来震中位置有积极的参考价值。

(3) 由于仪器工作周期、动态范围、频带响应等参数的不同,造成两仪器记录前驱波扰动出现的时间段、形态特征等存在明显差异。

(4) 建议在同一观测站(点)建立高灵敏度、高采样率、宽频带,或在不同频段上布设多种的同类型定点倾斜形变仪器,组成具有宽频带或低、中、高频段的全面观测系统,这对于捕捉近震的短临异常有实效意义。

本研究得到了中国地震局第二监测中心王庆良研究员的帮助,审稿专家提出了宝贵意见,在此深表感谢。

#### 参考文献:

- 陈德福. 2006. 潮汐形变前驱波的时空特征[J]. 大地测量与地球动力学, 26(2): 24-30.
- 陈双贵, 杨斐, 陈继锋, 等. 2011. 长周期形变波特征分析[J]. 地震研究, 34(3): 308-312.
- 高金哲, 吕政, 张洪艳, 等. 2005. 地震前驱波观测与进展[J]. 华南地震, 25(1): 53-58.
- 高振强, 冯建琴, 张仰辉, 等. 2009. 山西临汾中心地震台石英摆倾斜仪前驱波特征分析[J]. 山西地震, 4(2): 1-6.
- 高振强, 李艳, 冯建琴, 等. 2010. 临汾台摆式倾斜仪平行观测的差异性特征及其观测布局建议[J]. 大地测量与地球动力学, 30(增刊II): 22-26.
- 李冬梅, 白晓勤, 施行觉, 等. 2002. 山西侯马台记录到的强远震前兆波特征浅[J]. 大地测量与地球动力学, 22(3): 75-77.

- 马胜利,陈顺云,刘培涛,等. 2008. 断层阶区对滑动行为影响的实验研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学,38(7):842-851.
- 马武刚,胡国庆,谭业春,等. 2010. 新型宽频带垂直摆仪的设计及应用[J]. 测绘信息与工程,35(5):28-29.
- 王贤仁,卢艳清. 2002. 倾斜扰动与地震短临预报[J]. 地震研究,25(1):20-24.
- 尹亮,杨立明,雷等学,等. 2011. 大震前重力地脉动异常分析[J]. 地震研究,34(4):442-446.
- 尹亮,杨立明. 2010. 宽频带数字资料低频波在大震前的短临前兆信息研究[J]. 西北地震学报,32(1):82-87.
- 曾融生. 2005. 对我国地震预测研究的一些建议[J]. 国际地震动态,(2):24-24.
- 张淑亮,范雪芳. 2003. 井水位长周期事件记录及其机理的讨论[J]. 地震,23(4):85-90.

## Analysis on Characteristics of Precursor Wave Recorded by Tiltmeter at Linfen Station in Shanxi before Hejin M4.8 Earthquake

LI Yan<sup>1,2</sup>, GAO Zhen-qiang<sup>2,3</sup>, CHENG Dong-yan<sup>2,4</sup>, ZHANG Yang-hui<sup>1,2</sup>, LI Jun<sup>1,2</sup>

(1. Linfen Central Seismological Station, Earthquake Administration of Shanxi Province, Linfen 041000, Shanxi, China)

(2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030025, Shanxi, China)

(3. Xiaxian Central Seismological Station, Earthquake Administration of Shanxi Province, Xiaxian 044400, Shanxi, China)

(4. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, Shanxi, China)

### Abstract

Using the observation data recorded by SSO-2I quartz horizontal pendulum and VP wild band vertical pendulum tiltmeter, we analyzed the observation curves before Hejin M4.8 earthquake in Shanxi on Jan. 24, 2010 by the original shape curve method. The result showed that there were obvious precursor wave before Hejin M4.8 earthquake on the observation curves recorded by two observational means. The morphological characteristics of precursor wave were similar with the stick-slip of the rock mechanics, which may was the short impending anomaly information of the Hejin M4.8 earthquake. We also gave the mechanism explanation of the slow stick slip.

**Key words:** Hejin M4.8 earthquake; tiltmeter; precursor wave; slow stick-slip; short impending anomaly