

许健生,李丽,姜振海.临夏地震台观测到的临震预滑和震颤震相[J].地震工程学报,2021,43(2):272-278.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.272

XU Jiansheng, LI Li, JIANG Zhenhai. Observation of Pre-slip and Tremor Seismic Phase at Linxia Seismic Station[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(2): 272-278. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.272

临夏地震台观测到的临震预滑和震颤震相

许健生¹, 李 丽¹, 姜振海²

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 甘肃省地震局, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 对临夏地震台的 YRY-4 分量应变仪、水位仪和地震仪记录数据分析后发现:2008 年 5 月 12 日汶川 M_w 7.9 地震前,在 3 种不同学科的观测记录上,在相近时间段内均记录到了预滑震相 X_p 和震颤震相 T_p 。总结 X_p 震相和 T_p 震相记录特征的基础上,试图用实验室做的小尺度黏滑实验结果来佐证和解释所记录到的临震预滑和震颤震相的物理机制。结果表明:临震前的 2008 年 4 月 18 日和 5 月 6 日,临夏台所处的地块发生了 2 次较大幅度的预滑错动,在预滑发生前后还伴有 N 次震颤现象发生。临震前这 2 次较大幅度的预滑错动有可能引发了汶川 M_w 7.9 地震。

关键词: 预滑; 震颤; 预滑震相 X_p ; 震颤震相 T_p ; 汶川 M_w 7.9 地震

中图分类号: P312.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)02-0272-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.02.272

Observation of Pre-slip and Tremor Seismic Phase at Linxia Seismic Station

XU Jiansheng¹, LI Li¹, JIANG Zhenhai²

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

2. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Through the analysis of the data recorded by the Yry-4 component strain gauge, the water level gauge, and the seismograph at Linxia seismic station, it is found that before the Wenchuan M_w 7.9 earthquake on May 12, 2008, both of the pre-slip seismic phase X_p and the tremor seismic phase T_p were recorded by the above three instruments in a similar period. In this paper, based on the summary of the record characteristics of X_p and T_p phases, the physical mechanism of pre-slip and tremor phase recorded before the earthquake was confirmed and explained by the results of indoor small-scale stick slip experiments. The results showed that: on April 18 and May 6, 2008, two large-scale pre-slip dislocations occurred on the block where Linxia station is located, and N tremors were accompanied before and after the pre-slip. These two large-scale pre-slip dislocations may be related with the Wenchuan M_w 7.9 earthquake.

Keywords: Wenchuan M_w 7.9 earthquake; pre-slip; tremor; pre-slip seismic phase X_p ; tremor seismic phase T_p ;

0 引言

大震前在震中区及周边地块的断层面上发生的临震预滑和震颤现象是大多数地震前兆的物理基础,是地震学界一直关注的一种地震前兆信号。据历史地震资料记载:1556年1月23日陕西华县8 $\frac{1}{4}$ 级地震前7~8小时,在未来震中区“觉地旋运,因而头晕,……。”郭增建先生认为这是发生了缓慢的地面运动,是孕震断层上发生的预滑现象^[1-2]。近代地震观测也表明:在大地震前,也常有震颤现象发生,这种震颤往往还伴有“地声”现象。如1976年7月28日唐山7.8级地震前半小时到几分钟内,在距震中100 km范围内,有人听到了连绵不断的“隆隆”声,这种“隆隆”声可能是一种振动频率在声频范围内的高频颤动激发出的声波。但由于地下介质对频率较高的震颤吸收很快,其传播的距离不是太远,因而能听到这种地声的范围不大^[3]。因此,在过去台站密度有限的中国地震观测台网中,在大地震前记录到震颤和“地声”的报道并不多。

根据全球数字地震仪台网(GSN)的测定结果,2008年5月12日06时27分59.0秒(GMT),在中国汶川(31.06°N, 103.37°E, $h = 7.6$ km)发生了 $M_w 7.9$ 地震,地震造成了巨大的人员伤亡和财产损失。地震发生前的4月18日和5月6日,在距震中500 km的甘肃省临夏地震台(以下简称临夏台),YRY-4分量应变仪和水位仪均记录到了2次较大幅度的“阶跃形”震相 X_p (图1),推测可能是临震前临夏台所处地块发生预滑时激发出的预滑震相。在发生预滑前后,水位仪和地震仪记录到了 N 次间歇性的震颤波列 T_p (图2),推测可能是临震前地块在构造应力的作用下,地下气体在岩石裂隙内流动而激发出的震颤震相。

1 仪器和数据情况

1.1 应变仪

临夏台的YRY-4型分量钻孔应变仪传感器安装在井下44.7 m,仪器通频带宽0~20 Hz,分辨率为 10^{-11} ,应变观测量纲为 10^{-10} ,非线性度 $\leq 1\%$,采样率为每分钟1次。

1.2 水位仪

临夏台的钻孔水位仪的传感器与YRY-4型分量钻孔应变仪的传感器安装在同一钻孔内,记录的

是井深45 m的承压层水位数据,水位仪的分辨率为0.03 mm,采样率为每分钟1次。其水位变化如同YRY-4型分量钻孔应变仪的变化一样能显示固体潮变化形态^[4]。

临夏台的静水位观测井孔深度为200 m,观测仪器是LN-3A型数字水位仪,传感器放置在井下8.5 m处,采样率为每分钟1次,水位量程为0~10 m;分辨率为1 mm;测量准确度为 $\pm 0.2\%$ F.S;测量重复性为 $\pm 0.1\%$ F.S;测量稳定性为 $\pm 0.2\%$ F.S/年;动态响应速度为 > 1 m/s;使用温度为0~40 °C。静水位仪和钻孔水位仪不在同一井孔内,相距约10 m。

1.3 地震仪

临夏台的地震仪是宽频带、高灵敏度和大动态范围的数字化地震仪,地震计型号是BBVS-60,数采型号是EDAS-24IP,采样率为100次/s。

本研究所用的数字地震仪波形是没作滤波和仿真处理的原始记录波形。

2 X_p 和 T_p 震相的记录特征

2.1 X_p 震相记录特征

在YRY-4型分量钻孔应变仪和钻孔水位仪的数字波形记录上, X_p 震相有以下特征:

(1) 由图1可见, X_p 震相是震前出现的长周期震相,波形近似“阶跃形”。

(2) 钻孔应变仪记录的 X_p 震相和钻孔水位仪记录的 X_p 震相对比可见,钻孔水位仪记录的 X_p 震相要比应变仪记录的 X_p 震相迟到约2~5个小时。

(3) 同台的钻孔水位仪和静水位记录的 X_p 震相到时也不相同,静水位记录的 X_p 震相到时要比钻孔水位仪记录的震相迟到约8个多小时。

2.2 T_p 震相的记录特征

在钻孔应水位仪和地震仪的数字波形记录上, T_p 震相有以下特征:

(1) 由图2可见, T_p 震相是间歇性地“成丛”出现,多数 T_p 震相往往首尾相连,不易分辨初动。在个别 T_p 震相波列中有时可以细分出若干单一的 T_p 波列。每一个 T_p 波列由多个振动周期构成。在水位仪记录上, T_p 震相最大振幅周期约为4分钟,单一振动波列的持续时间约10多分钟。在地震仪的LH通道记录上, T_p 震相最大振幅周期范围为0.3~8 s,单一振动波列的持续时间约0.5~10 min不等。

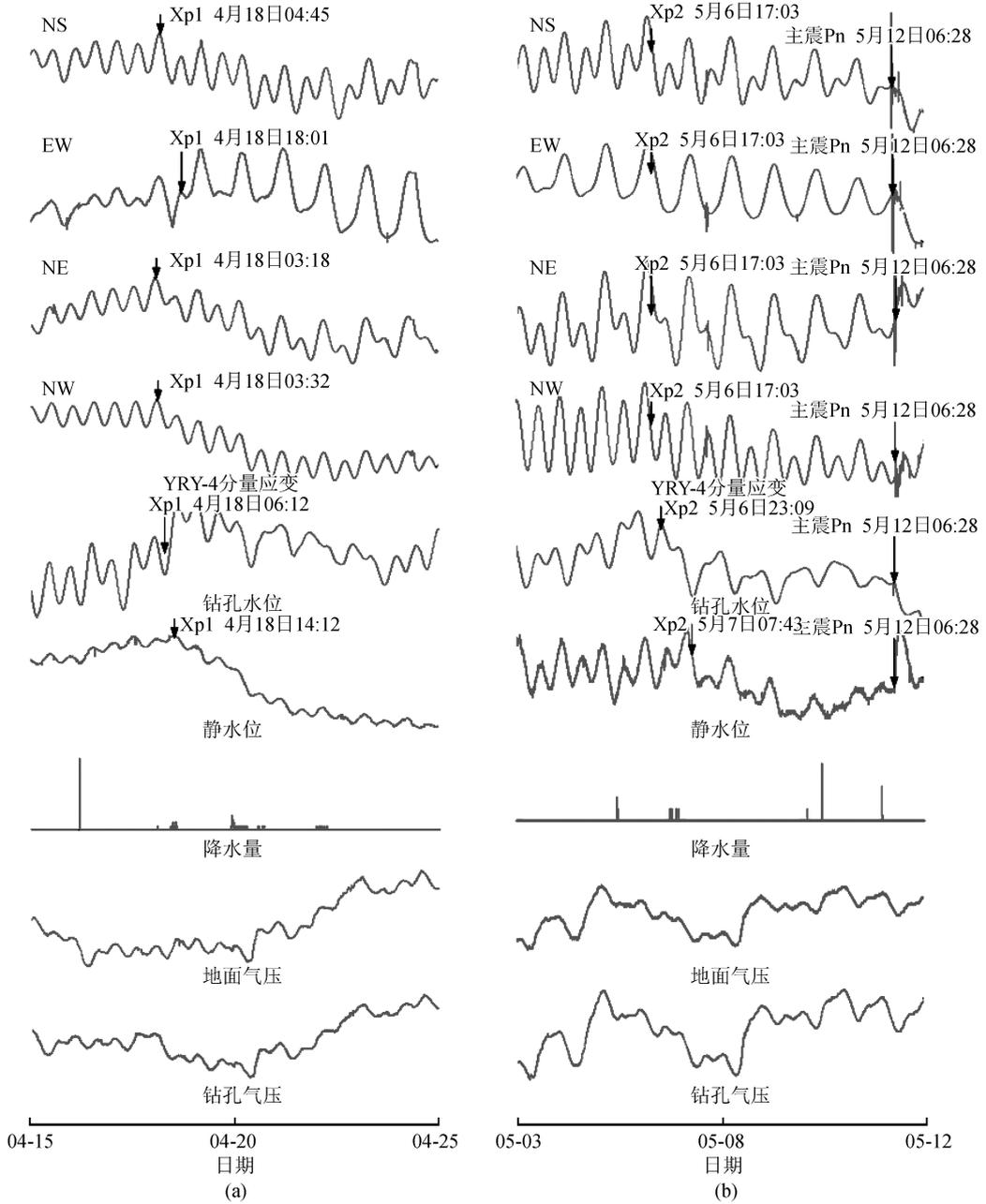


图1 临夏台 Xp 震相记录($\Delta=500$ km)

Fig.1 The recordings of Xp phase at Linxia station ($\Delta=500$ km)

(2) 由图 2 和图 3 可见, T_p 震相表现为一种弱起始, 逐渐变强的波动, 达到峰值后又逐渐衰减, 整个波列呈“纺锤形”。在地震仪三分向记录上分辨不出是纵波性质的振动还是横波性质的振动, 波形不同于岩石弹性破裂后的振动波形, 没有典型的纵波和横波震相, 整个波列形态类似于地震波中的导波震相 L_g 。

3 X_p 和 T_p 震相的物理机制

已有理论与实验^[2,5-8]表明, 大地震前在孕震地

块间的断层面上常有一种缓慢运动, 激发出长周期波动。这种长周期波动可能是岩石破裂前的缓慢蠕裂、断层预滑或断裂预扩展激发出的, 其周期一般为几十秒至几小时^[2,5-6]。

SONG^[9]用不同性质的岩石做脆性破裂实验的结果表明: 岩石块体受压后在主破裂前会有多次小破裂伴随着“阶跃”式应力降发生。

大量观测结果也表明在大震发生前, 震源区及其附近确实存在“缓慢移动”。如 1976 年唐山 7.8 级大地震前和 2001 年昆仑山口西 8.1 级等大地震

前,在其发震断层上都观测到了断层位移、井口变形等现象^[10]。这种“缓慢移动”可以产生频带很宽的振动,并以波的形式向外发射,有高频波(声频)

以地声的形式发射^[2],也有低频波,如帕萨迪那地震台应变仪记录到的周期为 300~600 s 的长周期波^[11]。

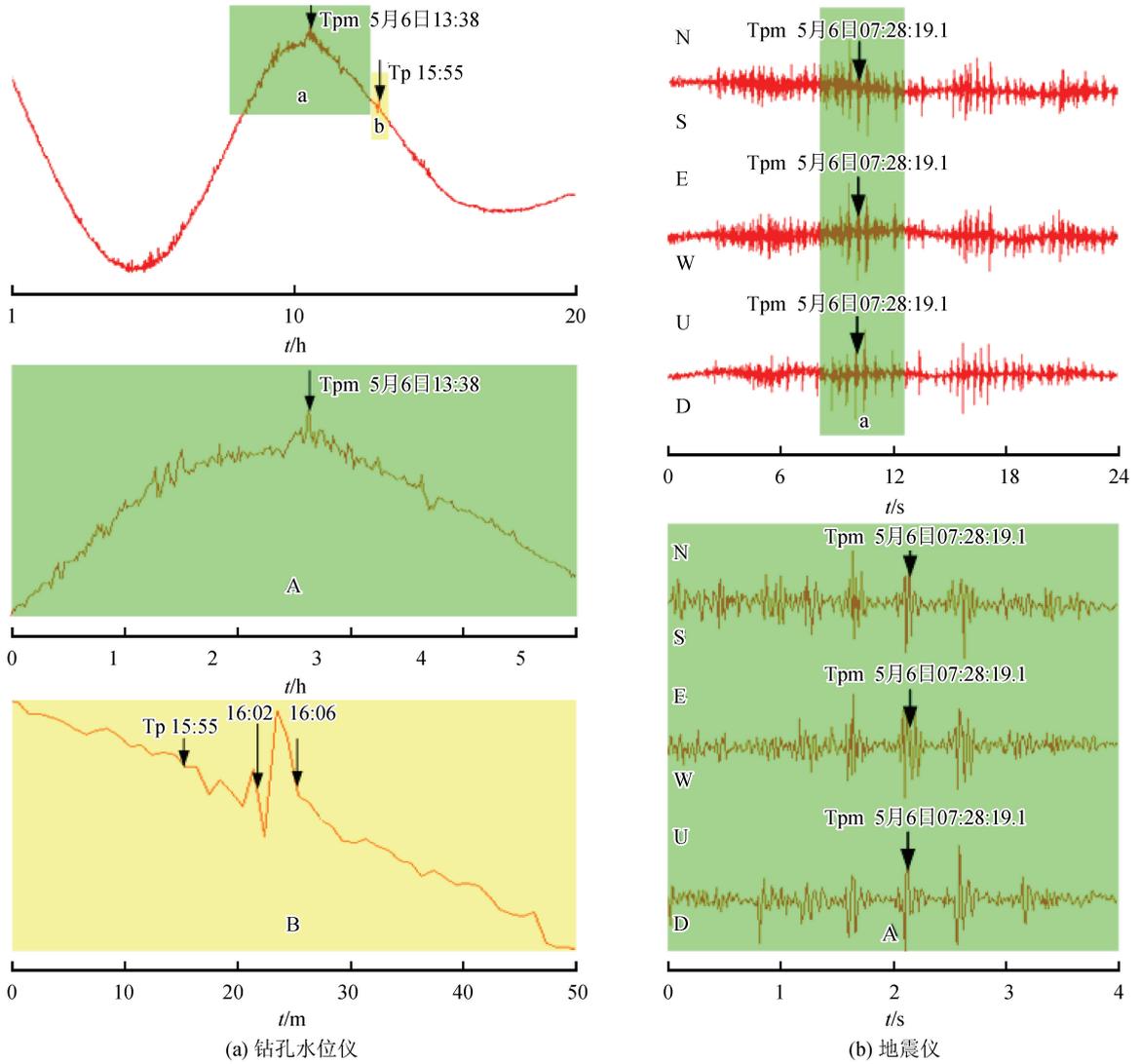


图 2 临夏台记录的 Tp 震相($\Delta=500$ km)

Fig.2 The recordings of Tp phase at Linxia station ($\Delta=500$ km)

由临夏台的记录可见;Xp 震相波形的“阶跃形”特征明显,与 SONG^[9]做的岩石脆性破裂实验中小破裂发生时所伴随的“阶跃形”应力降形态特征一致。由此推测;Xp 震相可能是临震前地块岩石主破裂前裂隙蠕裂、断裂预滑或断裂预扩展等行为激发出的预滑震相。

关于震颤的物理机制在国内外文献中都鲜有报道,仅有的一些观测结果表明,在一些板块构造的边缘,如北美的卡斯卡迪亚岛的俯冲构造带上,在观测到慢滑动事件时,观测到的颤动(Tremor)次数会明显增多。并据此推测,可能是板块间的慢滑动摩擦

激发了颤^[12]。

本文根据临夏台 2 种不同学科的观测仪器记录到的 Tp 震相波形与地震波中的导波 Lg 波形相似和在地震仪记录的三个分向都分辨不出是纵波性质的振动还是横波性质的振动的记录特征推测,Tp 震相的生成机理可能与 Lg 波的生成机理类似,是一种波动能量被“拘留”在某个波导“通道”内的导波^[13]。生成 Tp 波的“通道”可能是因临震前构造应力相对集中导致地块内新旧裂隙贯通而形成的。设想当构造应力相对集中地挤压某个地块,致使地块内新旧裂隙贯通而形成“通道”的同时,也会使地块

内流体受压后析出气体,气体在不同宽度的裂隙“通道”内流动或溢出时,势必会激发出不同频率的震颤。这种震颤的频率可能与气体流动的裂隙宽度有关,即气体或液体在不同宽度的裂隙内流动可能会形成不同频率的震颤(图3)。较高频的震颤有可能被

宽频带地震仪记录到,较低频的震颤有可能被水位仪记录到。这种震颤传播到地表面,在声频范围内的震颤可以被听到,称之为“地声”。从目前为数不多的地声波形记录可见^[3,14],其记录波形与本文给出的Tp震相波形相似,也与导波Lg波形非常相似。

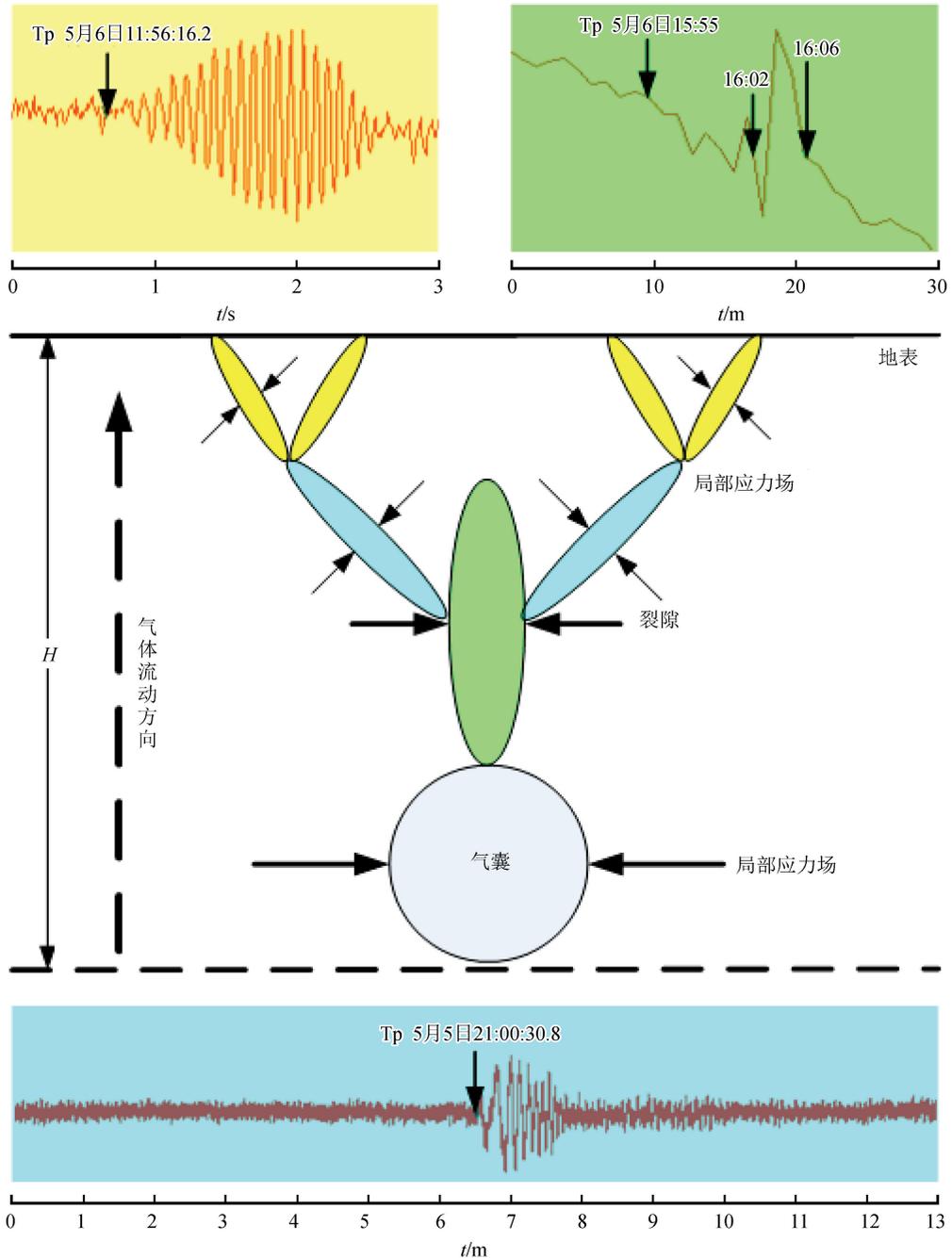


图3 震颤震相形成机制示意图

Fig.3 Schematic diagram of the formation mechanism of tremor phase

4 观测结果和可靠性讨论

在对临夏台的观测结果讨论之前,首先对上述

的“预滑”和“震颤”信号的可靠性进行讨论,即上述的“预滑”和“震颤”信号是否是仪器自身问题或外界气象因素造成的干扰?

对此问题,我们根据同一台站,在相近时间段,3种不同观测手段,在不同井孔都观测到了这种“预滑”和“震颤”信号的情况认为:这种同一台站,在相近时间段,在不同井孔,3种不同学科的观测仪器,同时出现仪器问题的可能性应该较小。另外,是否是外界气象因素干扰?对此问题我们认为:如果是外界气象因素干扰,如气压和降水的干扰,应该在3种不同学科的观测仪器上“同时”记录到。而临夏台观测到的“预滑”和“震颤”信号是在相近时间段内,但并不是“同时”记录到,因此,不应是外界气象因素所致。另由图1给出的相同时间段内的钻孔气压、地面气压和降水量记录可见,在出现“预滑”和“震颤”信号的时段,钻孔气压、地面气压和降水量变化都比较小。当气压和降水变化比较大时并没有记录到相应的 X_p 震相和 T_p 震相,它们之间没有相关性。那“震颤”是否是由2008年5月8日到5月14日发生在西太平洋上的“威马逊”台风激发的呢?显然不是,因为这些“预滑”和“震颤”现象发生在“威马逊”台风生成之前。因此,上述的“预滑”和“震颤”信号是仪器自身问题或其他外界气象因素干扰的可能性都较小,而由震前预滑和震颤形成的可能性较大。

对于在同一台站,不同学科的观测仪器记录到的 X_p 震相、 T_p 震相的到时不同,我们认为:用实验室内小尺度花岗岩样品做的黏滑实验结果^[7,15]可以解释这个问题。实验结果表明:①同一样品,同一观测手段,加压后,在样本的不同部位对应变变化的响应时间会不同;②同一样品,不同观测手段,即使采样率一致,对应变变化的响应时间也不同。

依据上述实验结果,我们认为:临夏台不同学科的观测仪器记录到的 X_p 震相和 T_p 震相的时间不同与不同观测手段响应的物理过程不同有关;与不同的物理过程发生在台站下方的不同深度或不同部位有关。如YRY-4分量应变仪观测的是应变传感器周边的应变波动过程,水位仪观测的是承压层水位的压力传递过程,地震仪观测的是地表以下不同深度裂隙“通道”内的气体流动或溢出时激发的“震颤”过程。因此,在同一构造力场的作用下,这2个物理过程虽发生在同一台站下方和附近,但可能发生在不同深度和不同部位,这样在同一台站,不同学科的观测仪器,对不同的物理过程的响应时间应该是不同的。这与地震发生后,在不同的观测手段上能同时观测到地震波到时不同。地震发生后,同一台站不同仪器观测到的是发生在相同深度、相同距

离的同一物理过程,是一种“同场同源”的物理过程。而临夏台不同学科的观测仪器记录到的预滑和震颤时间不同是因不同学科的观测仪器记录到的信号是“同场”,但不“同源”。是同一构造应力场的作用下,在同一台站下方或附近不同深度、不同部位和不同物理过程作用的结果。

那这些预滑和震颤现象与5月12日汶川 $M_w 7.9$ 地震有什么关系呢?图4尽可能长的给出了震前一段时间内的观测记录,发现在2008年3月份以前,3种观测记录曲线都比较平直。3月份以后,钻孔水位仪和静水位仪开始陆续记录到一些幅度较小的预滑错动。4月18日和5月6日,3种观测仪器同时记录到了2次幅度较大,发生时间也较集中的预滑错动和 N 次震颤。这种发生在震中周边地块上幅度较大,时间较集中的预滑错动除了会使地块内应力一应变发生“阶跃形”变化外,还会在地块间某些滑动受阻的断层面上集聚构造力。当集聚的构造力大到可以克服受阻断层面上的摩擦力或岩石的破坏强度时,则会导致断层错动和岩石破裂,形成构造地震。据此推测:4月18日和5月6日的2次幅度较大,发生时间较集中的预滑错动可能导致区域构造力在龙门山断裂带被积累。当区域构造力积累到可以克服龙门山断层带上的摩擦力或岩石破裂强度时,断层岩石发生突然破裂和失稳滑动,引发了汶川 $M_w 7.9$ 大地震。

5 几点认识

根据上述理论研究、实验和观测结果,有以下几点认识:

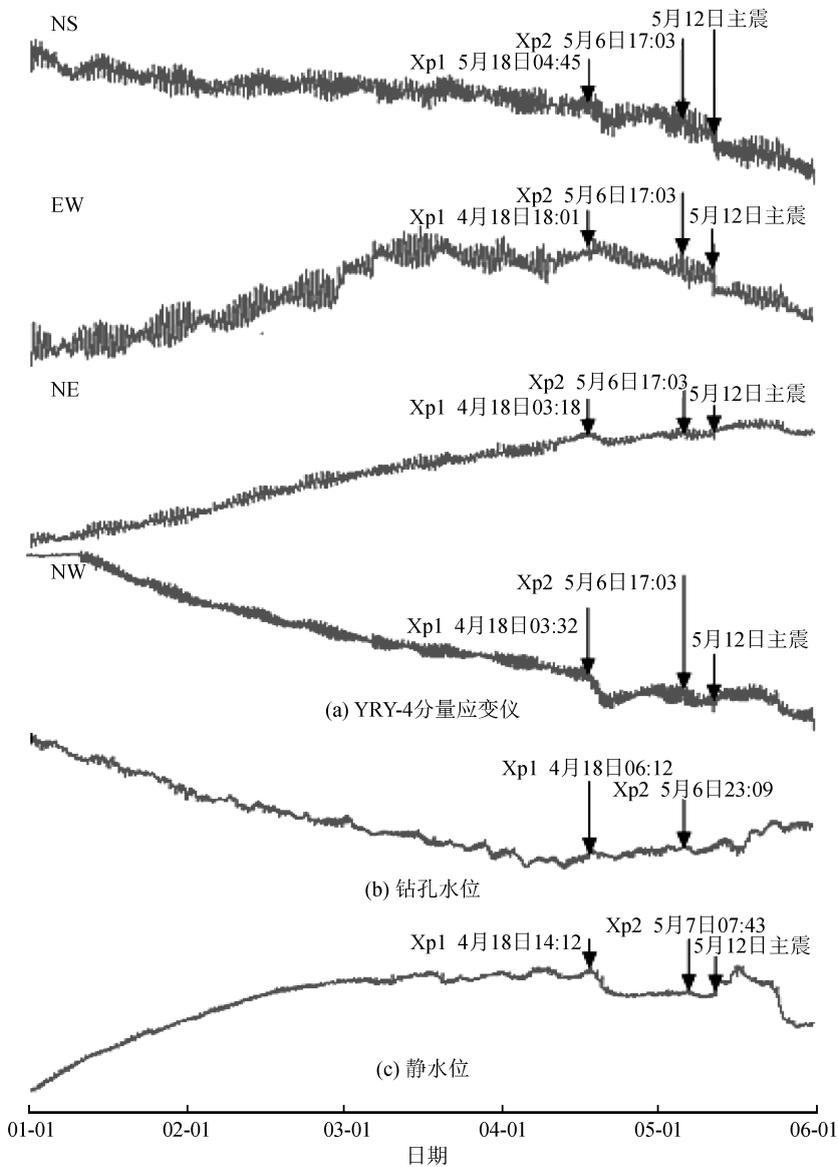
(1) 临夏台记录到的 X_p 震相可能是台站所处地块在震前发生预滑错动后激发出的预滑震相。

(2) 临夏台记录到的 T_p 震相可能是台站所处地块在构造应力作用下,岩体内的新旧裂隙贯通,形成了地下气体流动的“通道”,当气体在裂隙“通道”内流动时,激发出的震颤震相。

(3) X_p 震相的观测结果表明:临震前24多天,2次幅度较大,发生时间较集中的预滑错动,可能引发了汶川 $M_w 7.9$ 地震。

(4) T_p 震相的观测结果表明:在发生预滑错动时常伴有震颤现象发生。

(5) X_p 和 T_p 震相是临震前构造力在震中周边地块断层面上集聚过程的直接观测证据,是值得关注的前兆信息。研究 X_p 和 T_p 震相有助于认识临震前震中周边地块的预滑活动和构造力集聚过程。

图4 Xp震相记录($\Delta=500$ km)Fig.4 The recordings of Xp phase ($\Delta=500$ km)

本文用的数据转换和震相标注均由黑龙江省地震局和跃时高级工程师提供的《CDSN地震台站分析软件》完成,在此深表谢意。

参考文献(References)

- [1] 郭增建.1556年1月23日关中大地震[J].地球物理学报,1957,6(1):59-68.
GUO Zengjian.On the Shensi Earthquake of January 23,1556[J].Chinese Journal of Geophysics,1957,6(1):59-68.
- [2] 郭增建,秦保燕.大震前予位移的讨论[J].西北地震学报,1979,1(2):34-40.
GUO Zengjian,QIN Baoyang.A Discussion on Pre-slipping Prior to Great Earthquake[J].Northwestern Seismological Journal,1979,1(2):34-40.
- [3] 池顺良.深井宽频钻孔应变地震仪与高频地震学:地震预测观

测技术的发展方向,实现地震预报的希望[J].地球物理学进展,2007,22(4):1164-1170.

CHI Shunliang. Deep Hole Broad-Band Strain-Seismograph and High-Frequency Seimology—The Hope to Successful Earthquake Prediction[J].Progress in Geophysics,2007,22(4):1164-1170.

- [4] 刘序俨,杨锦玲,陈超贤,等.临夏台钻孔系统性质的论证[J].地球物理学报,2016,59(9):3343-3353.
LIU Xuyan,YANG Jinling,CHEN Chaoxian,et al.The Argumentation of Properties of Borehole System at Linxia Station,China[J].Chinese Journal of Geophysics,2016,59(9):3343-3353.
- [5] 冯德益,潘琴龙,郑斯华,等.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,1984,6(1):41-57.
FENG Deyi,PAN Qinlong,ZHENG Sihua,et al.Long-period Deformational Waves and Short-term and Imminent Earthquake Precursors[J].Acta Seismologica Sinica,1984,6(1):41-57.

- [15] 曾文浩,杨兴悦,史继平,等.2013 年甘肃岷县漳县 $M_S6.6$ 地震前甘东南地区前兆异常分析[J].地震研究,2015,38(3):341-351.
ZENG Wenhao, YANG Xingyue, SHI Jiping, et al. Analysis on the some Typical Precursory Anomalies before Minxian — Zhangxian $M_S6.6$ Earthquake in Southeast Area of Gansu Province in 2013[J]. Journal of Seismological Research, 2015, 38(3): 341-351.
- [16] 曾文浩,杨兴悦,王燕,等.天水地电阻率观测资料映震能力探讨[J].大地测量与地球动力学,2017,37(增刊IV):108-112.
ZENG Wen-hao, YANG Xing-yue, WANG Yan, et al. Discussion on Earthquake Reflecting Ability on Geo-Electrical Resistivity Data in Underground Well at Tianshui Station[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(Supp. IV): 108-112.

(上接第 278 页)

- [6] 姚孝新.破裂速度和地震[J].地球物理学报,1976,19(2):118-124.
YAO Xiaoxing. Rupture Velocity and Earthquake [J]. Acta Geophysica Sinica, 1976, 19(2): 118-124.
- [7] DIETERICH. Preseismic Fault Slip and Earthquake Prediction [J]. Journal of Geophysical Research (Solid Earth) [J], 1978, 83: 3940-3948.
- [8] 李普春,刘力强,郭玲莉,等.粘滑过程中的多点错动[J].地震地质,2013,35(1):125-137.
LI Puchun, LIU Liqiang, GUO lingli, et al. Multi-Point Dislocation in Stick-slip Process [J]. Seismology and Geology, 2013, 35(1): 125-137.
- [9] SONG Lili. A Novel Experiment Method of Evaluating the Brittleness of Rock [J]. SPE 2014, 167730, 1-4.
- [10] 车用太,鱼金子,张淑亮,等.山西朔州井水位的“前驱波”记录及其讨论[J].地震学报,2002,24(2):210-216.
CHE Yongtai, YU Jinzi, ZHANG Shuliang, et al. The Records of Water Level “Precursors” and Their Discussion in Well Shuozhou, Shanxi Province [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(2): 210-216.
- [11] HIROO Kanamori, JOHN J Cipar. Focal Process of the Chilean Earthquake May 22, 1960 [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1974, 9: 128-136.
- [12] ROGERS G, DRAGERT H. Episodic Tremor and Slip on the Cascadia Subduction Zone: the Chatter of Silent Slip [J]. Science, 2003, 300: 1942-1943.
- [13] 许健生,隗永刚,周建超.中国数字地震仪台网(CDSN)典型震相图集[M].北京:石油工业出版社,2014:13-32.
XU Jiansheng, WEI Yonggan, ZHOU Jianchao. The Atlas of Typical Seismic Phase of China Digital Seismograph Network (CDSN) [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2014, 13-32.
- [14] 董树华,刘元壮.地声观测研究[J].地震学报,1986,8(4):439-443.
DONG Shuhua, LIU Yuanzhan. Geosound Observation and Research [J]. Acta Seismologica Sinica, 1986, 8(4): 439-443.
- [15] 郭彦双,马瑾,云龙.拐折断层黏滑过程的实验研究[J].地震地质,2011,33(1):26-35.
GUO Yanshuang, MA Jin, YUN Long. Experimental Study on Stick-Slip Process of Bending Faults [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 26-35.