

张淑亮、刘瑞春、吕芳, 2012, 静乐井水位前驱波重现性问题探讨, 中国地震, 28(2), 200 ~ 213。

# 静乐井水位前驱波重现性问题探讨

张淑亮<sup>1,2)</sup> 刘瑞春<sup>1,2)</sup> 吕芳<sup>1,2)</sup>

1) 山西省地震局, 太原市晋祠路二段 69 号 030002

2) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025

**摘要** 以山西静乐井为研究对象, 对井水位前驱波重现性问题进行了探讨。结果表明, 相似地震前前驱波起始时间和波动周期在一定范围内具有较强的重现性, 其比例可达 63.1%; 部分相似地震前前驱波的波动形态和幅度也存在一定的相似性, 但在研究范围内前驱波各项特征均相似的地震尚未发现, 其原因可能与前驱波的成因、传播途径、相似地震的震源区特征等因素有关。

**关键词:** 前驱波 地震 井水位 重现性

[文章编号] 1001-4683(2012)02-0200-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 前言

自 20 世纪 70 年代金森博雄报道在 1960 年 5 月 22 日智利 8.3 级地震前 15 分钟, 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周期为 300 ~ 600s 的长周期波(前驱波)(陈运泰, 1992)以来, 国内外不断出现相关报导。在我国已通过许多方法得到了很多显著的前驱波信息, 如: 跨断层形变、超低频电磁异常、次声波异常、井下低频导波、井水水位等。

近年来, 国内外一些学者从不同的观测角度认识前驱波, 并进行了初步研究, 且取得了一些进展。小至 5 级左右地震, 大到 8 级以上的巨震, 震前基本上都可以观测到前驱波现象(王庆良等, 2005); 低频前驱波具有数小时 ~ 数十天的短临预报指标(车用太等, 2002); 低频前驱波现象不是气压、风、降雨等干扰因素的短期突变所造成的, 可能反映了大震前震源内部信息(张淑亮等, 2005)。对地震前驱波现象虽然有大量报道, 且对地震短临预测有一定的指示意义, 但真正将低频前驱波用于地震预测却还存在一定的困难。如地点相同、震级相近的地震在同一测点所记录的前驱波特征是否具有重现性? 同一地震不同测点低频前驱波现象是否具有普遍性等? 而这些问题对能否将地震前驱波用于短临预测尤为关键, 特别是相似地震前驱波的重现性问题的研究对能否将地震前驱波用于预测发震地点又是至关重要的。

[收稿日期] 2012-01-18

[项目类别] 山西省科技攻关项目(2006031106)、地震科学联合基金(A08051)及山西省自然科学基金(2011011027)共同资助

[作者简介] 张淑亮, 女, 1963 年生, 正研级高工, 主要从事地震综合预报工作。E-mail: shuliangz@yahoo.cn

早在 20 世纪五、六十年代地震学家就开始关注重复地震。将两个发生在同一位置,并且在同一台站具有高度相似波形的地震事件称为重复地震(Poupinet et al, 1984)。本文利用山西地区对地壳应力-应变以及前驱波响应能力较强的静乐井水位观测资料,并以其 3 组高值异常在华北地区 5~6 级地震前具有相似性和 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级主余震前有显著的前驱波记录为研究依据,对 1999~2003 年相似地震前井水位前驱波特征是否具有重现性问题进行初步探索,并取得了一些新的认识。

## 1 静乐井基本概况

静乐井位于山西省静乐县娘子神乡,井点坐标为 38.35°N、112.03°E,地面海拔高程为 1274.6m。静乐娘子神井地处东碾河断裂带,井深 362.92m。该区为东碾河河谷区,其北部和南部均为山区,为一走向近 EW 向的峡长地带,河谷区海拔高程为 1266~1287m。井区为河谷地区,主要发育有下古生界灰岩、白云岩喀斯特含水层及第四系冲洪积砂砾石含水层,两个含水层间有较强的水力联系。含水层岩石溶洞发育,在井 230~290m 处通过破碎带,通过断裂破碎带补给水源。含水层厚度 316.6m,井孔涌水量可达 1987.2 m<sup>3</sup>/d,含水层渗透系数为 2.41~11.15 m/d。因此该井具备作为地震地下水观测井的优良条件。

静乐井水位年变形态明显,映震能力较强,能记录到全球 7 级以上地震的水震波,且在 50% 的地震前有较显著的前驱波记录(张淑亮等,2005)。特别是在 2008 年 5 月 12 日汶川 8 级主震以及其后的 6.4 级强余震前均记录到显著低频前驱波(图 1、2)。因此,以静乐井水位为研究对象,对井水位前驱波重现性问题进行探讨具有较优越的基础条件。

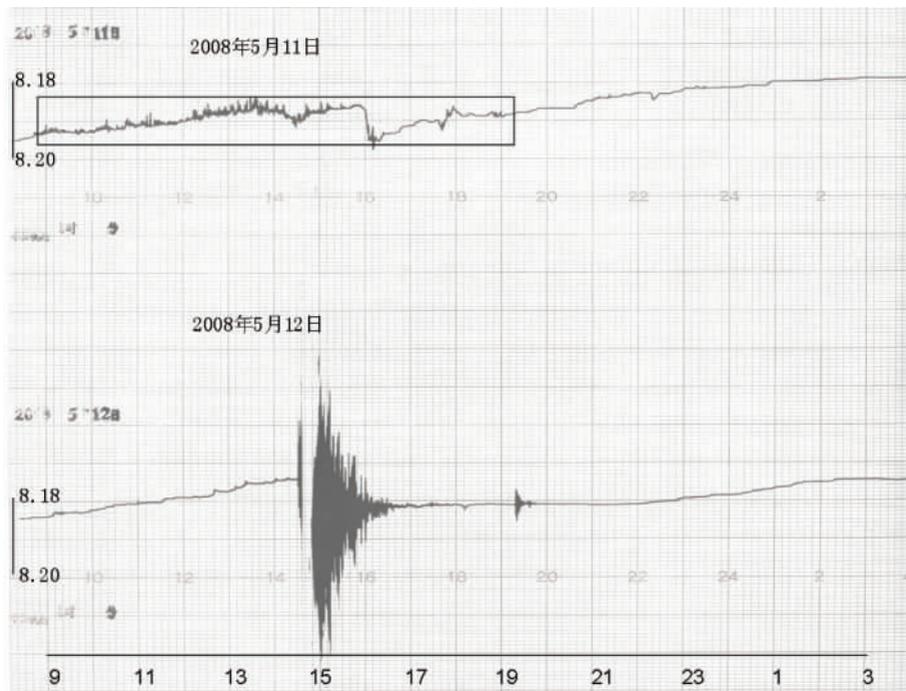


图 1 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震前静乐井水位前驱波图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

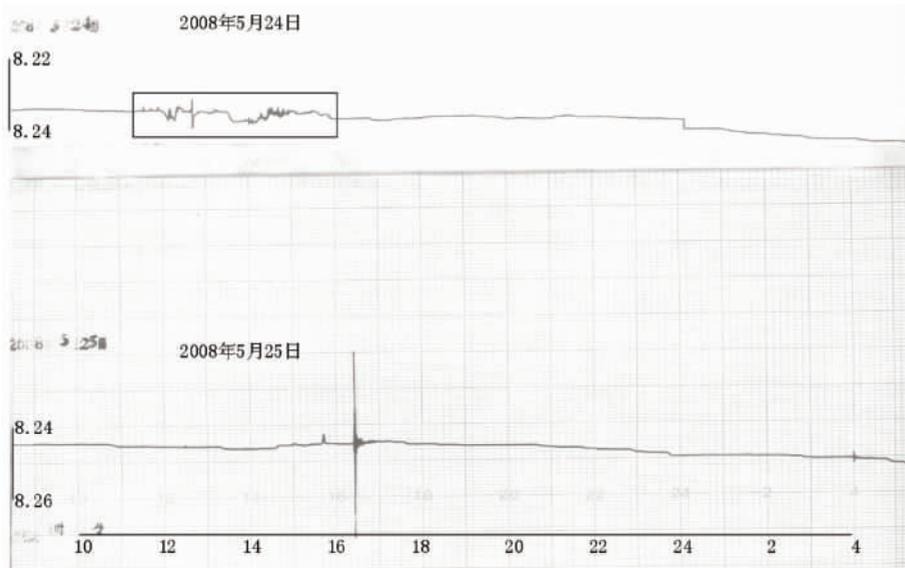


图2 2008年5月25日汶川6.4级地震前静乐井水位前驱波图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

## 2 相似地震前静乐井前驱波信息统计

### 2.1 研究时段前驱波信息统计

1999~2003年以来全球共发生7级以上地震90次(不含中国大陆及台湾地区),全国发生5.0级以上地震211次(地震目录来自D:\MapSIS\B01地震目录\_最新)。在此期间山西静乐井水位记录到185条前驱波信息,其中震前有前驱波记录的108次,占地震总次数的35.9%,占前驱波总次数的58.4%。前驱波的优势周期在30~60min,最大波动幅度达23mm。

### 2.2 研究时段相似地震统计与分组

为了探讨前驱波的重现性问题,本文把震中位置基本相同(地理坐标相差 $\leq 1^\circ$ )、震级相近(震级差 $\leq 0.5$ )的地震称为相似地震,并对其进行了分组。在统计样本中共归纳出29组相似地震(表1)。由表1可见,震前均有前驱波记录的有8组,占总组数的27.6%,至少有2次地震前有前驱波记录的4组,占13.8%,仅有1次地震前有前驱波记录的7组,占24.1%,完全无前驱波记录的10组,占34.5%。而对前驱波重现性研究有意义的是震前均有前驱波记录或至少有2次震前有前驱波记录的相似地震。由统计结果可以看出,这两类地震的组数占相似地震总组数的41.4%。

### 2.3 相似地震前井水位前驱波重现性分析

#### 2.3.1 井水位前驱波重现性的判定方法与指标

大量的观测事实表明,低频前驱波一般出现在震前数小时~十天的时间范围内,波动周期为数分钟~数十分钟。因此,前驱波的起始时间和波动周期也是目前识别前驱波的关键性指标。本文所研究的前驱波重现性问题,就是对相似地震前同一测点在数小时~十天范

表 1 全球 7.0 级以上和中国大陆 5.0 级以上相似地震前驱波信息统计表

序号	地震基本参数					震前有无前驱波	距发震时间 (h)	持续时间 (h)	波动周期 (min)	最大波动幅度 (mm)	同组地震有前驱波记录所占比例 (%)
	地震时间 (年-月-日)	经度 (°)	纬度 (°)	地点	震级						
1	1999-09-21	121.1	23.7	台湾南投	7.6	有	10	1.17	20	9	67
	1999-09-26	121.1	23.9	台湾南投	7.1	无	20	5	10	3	
	2002-03-31	122.1	24.4	台湾东海	7.5	有	24	0.5	30	4	
2	1999-03-20	-177.9	51.4	阿留申群岛	7.0	有	6.17	3.75	40	3	100
	2003-03-18	-177.9	51.6	阿留申群岛	7.2	有	34.77	9	50	5	
3	2001-12-24	160.0	-09.2	所罗门群岛	7.0	有	76	13	20	3	100
	2003-01-20	160.6	-09.8	所罗门群岛	7.5	有	55.62	11	20	2	
4	1999-02-07	167.0	-12.1	圣克鲁斯群岛	7.2	有	31.33	3	20	2	100
	1999-12-29	167.9	-11.4	圣克鲁斯群岛	7.0	有	154.65	14.83	30	3	
5	2000-11-16	154.0	-04.1	所罗门群岛	7.7	无					0
	2000-11-16	153.9	-03.8	所罗门群岛	7.8	无					
6	1999-04-08	130.3	43.4	吉林汪清	7.0	有	4.67	0.5	30	2.5	100
	2002-06-29	130.6	43.5	吉林汪清	7.2	有	10.15	9.83	30	18	
7	2001-10-12	144.6	13.5	马里亚纳群岛	7.2	无					0
	2002-04-27	144.6	13.4	马里亚纳群岛	7.1	无					
8	2001-12-24	160.0	-09.2	所罗门群岛	7.0	有	99.87	14.92	20	3	100
	2003-01-20	160.6	-09.8	所罗门群岛	7.5	有	55.62	11.07	40	2	
9	2003-05-26	141.9	38.7	日本仙台近海	7.0	无					50
	2003-10-31	142.8	37.8	日本本州东海	7.1	无	24.77	1.17		3	
10	2001-01-16	101.1	-05.7	印度尼西亚	7.2	无					0
	2001-02-14	102.1	-06.1	苏门答腊	7.4	无					
11	2000-06-05	102.2	-04.7	苏门答腊	7.8	无					0
	2000-06-08	102.0	-03.8	印度尼西亚	7.0	无					
12	1999-07-01	92.5	32.7	西藏聂荣	5.1	无					67
	2000-01-05	92.7	32.4	西藏聂荣	5.2	有	22.67	0.5	30	6	
	2003-05-25	92.4	32.7	唐古拉山口	5.0	有	40.37	9.33	70	6	
13	2000-07-10	92.3	32.9	唐古拉山口	5.6	有	214.92	0.42	25		50
	2000-10-31	92.4	32.8	唐古拉山一带	5.4	无					
14	2000-04-15	95.4	32.9	青海杂多	5.3	有	52	1.17	25		50
	2001-07-26	95.9	33.3	青海治多杂多交界	5.7	无					
15	1999-05-30	93.4	32.4	青海唐古拉山	5.6	有	98	1.33	30		100
	2003-02-11	93.8	32.6	唐古拉山口	5.1	有	36.27	20.3	50		
	2003-05-21	93.1	32.8	青海杂多县西	5.0	有	58.57	4.83	40	6	
16	2000-10-29	91.9	32.5	西藏安多	5.3	无					0
	2000-10-31	91.6	32.6	西藏那曲安多	5.5	无					
17	1999-11-26	99.9	34.6	青海玛沁	5.0	无					25
	2000-09-21	99.7	35.4	青海省兴海	5.0	无					
	2000-10-20	99.5	35.3	青海兴海	5.0	无					
	2001-07-17	99.7	35.5	青海兴海	5.0	有	104.87	15.25	30		
18	2000-02-12	90.8	33.8	唐古拉山	5.4	无					0
	2000-11-09	90.8	34.1	青海海西	5.2	无					

续表 1

序号	地震基本参数					震前有无前驱波	距发震时间 (h)	持续时间 (h)	波动周期 (min)	最大波动幅度 (mm)	同组地震有前驱波记录所占比例 (%)
	地震时间 (年-月-日)	经度 (°)	纬度 (°)	地点	震级						
19	2003-01-04	77.0	39.5	新疆伽师	5.4	有	66.45	14.7	15	4	75
	2003-02-25	77.3	39.5	新疆伽师	5.5	无					
	2003-03-12	77.4	39.5	新疆伽师	5.8	有	51.78	6.67	20	2	
	2003-05-04	77.3	39.4	新疆伽师	5.8	有	48.57	47.3	30	6	
20	2001-10-27	100.6	26.2	云南永胜	6.0	有	3	5.42	15	1.5	75
	2000-01-15	101.1	25.5	云南姚安	6.5	无					
	2003-07-21	101.2	26.0	云南大姚	6.2	有	8.68	7	50	6	
	2003-10-16	101.3	26.0	云南大姚	6.1	有	5.8	0.08	5	2	
21	1999-09-23	84.5	42.4	新疆轮台	5.1	无					0
	2001-03-24	84.7	42.7	新疆和静	5.1	无					
22	2001-04-10	99.1	24.5	云南施甸	5.2	有	72.05	15.5	60		100
	2001-06-08	99.1	24.8	云南施甸	5.3	有	29.08	0.87	15		
23	1999-11-25	102.8	24.5	云南澄江	5.2	无					0
	2000-01-27	103.6	24.2	云南丘北、弥勒间	5.5	无					
24	2003-11-15	103.7	27.2	云南鲁甸	5.2	有	10.65	3	20	2	50
	2003-11-26	103.6	27.3	云南鲁甸	5.0	无					
25	2001-11-19	94.0	35.9	青海格尔木	5.7	无					33
	2001-11-20	93.8	35.8	青海格尔木	5.6	无					
	2001-12-08	93.3	36.0	青海格尔木	5.4	有	36.8	10.5	50	3	
26	1999-09-14	104.1	31.6	四川绵竹	5.0	无					0
	1999-11-30	104.4	31.4	四川安县	5.0	无					
27	1999-11-29	123.2	40.4	辽宁岫岩与海城间	5.4	无					0
	2000-01-12	123.1	40.5	辽宁岫岩与海城间	5.1	无					
28	1999-11-02	121.6	23.5	台湾花莲东南海中	6.6	无					33
	2000-07-29	120.7	23.7	台湾南投与嘉义间	6.2	无					
	2003-06-10	121.6	23.6	台湾花莲以东海域	6.0	有	47.97	5.8	20	2	
29	2002-09-01	122.3	24.1	台湾以东海中	5.6	有	85.6	0.83	50	15	100
	2003-06-09	121.8	24.6	台湾宜兰、苏澳间	5.8	有	16	5	30	10	

围内,是否存在波动周期为数分钟~数十分钟的低频波动现象进行统计,并把相似地震前前驱波的出现时间以及波动周期是否满足上述条件作为井水位前驱波重现性的判定依据。根据表 1 相似地震前有前驱波记录所占比例给出了 3 种重现性定性判别指标。即同组相似地震前均有前驱波记录视为重现性强;同组相似地震前至少有 2 次震前有前驱波记录的视为重现性较强;同组相似地震前仅有 1 次震前有前驱波记录的视为重现性较差。在此基础上进一步对相似地震前重现性较强的前驱波的持续时间、波动形态和波动幅度等特征标志是否具有重现性进行探讨,并把持续时间差小于 1 小时的视为持续时间具有重现性,波动幅度不大于 3mm 的视为持续时间具有重现性,波动形态或均为阶变或均为周期波动或均为脉动变粗的视为波动形态具有重现性。

### 2.3.2 井水位前驱波特征重现性统计

按照上述判别指标,对表 1 给出的相似地震前前驱波的重现性进行了统计。由表 1 可知,29 组相似地震中至少有 1 次地震前有前驱波记录的有 19 组,至少有 2 次地震前有前驱波记录的有 12 组,震前均有前驱波记录的有 8 组。按照重现性判别指标,19 组有前驱波记

录的相似地震中,重现性强的有 8 组,占 42.1%;重现性较强 4 组,占 21%,重现性较差的 7 组,占 36.9%。重现性较强的前驱波的组数占至少 1 次地震前有驱波记录的相似地震组数的比例为 63.1%,占有统计时段相似地震组数的 41.4%。统计结果表明,相似地震前井水位前驱波在一定的时间和周期范围内具有较强的重现性特征。

虽然相似地震前识别前驱波关键性指标具有较强的重现性,但这些具有重现性特征的前驱波在波动形态、波动幅度以及持续时间上是否也具有重现性特征呢?为此,本文又进一步将相似地震震级差 $\leq 0.2$ 、震中地理坐标几乎完全重合的地震前前驱波的形态、波动幅度以及持续时间等特征进行了比较(表 1 中满足上述条件的地震有 4 组),结果见表 2、图 3~6。由图表可见,4 组地震中前驱波持续时间相差最小的是 2003 年 3 月 13 日、5 月 4 日新疆伽师 2 次 5.8 级地震前相差 3.33 小时,其余 3 组持续时间分别是阿留申群岛地震为 5.63 小时、云南大姚地震为 6.67 小时、吉林汪清地震为 9.33 小时,4 组地震前的前驱波持续时间均大于 1 小时,不满足重现性特征。从前驱波波动幅度上看,1999 年 3 月 20 日、2003 年 3 月 18 日阿留申群岛 7.0 级、7.2 级地震前相差为 0mm,2003 年 3 月 18 日、10 月 16 日云南大姚 6.2 级、6.1 级地震前相差 2mm,2003 年 3 月 13 日、5 月 4 日新疆伽师 2 次 5.8 级地震前相差 3mm,1999 年 4 月 8 日、2002 年 6 月 29 日吉林汪清 7.0 级、7.2 级地震前相差 15.5mm,波动幅度符合相似性指标的有 3 组。从波动形态上看,1999 年 3 月 20 日、2003 年 3 月 18 日阿留申群岛 7.0 级、7.2 级地震前均为周期波动,2003 年 3 月 13 日、5 月 4 日新疆伽师 2 次 5.8 级地震前均为脉动变粗,而 2003 年云南大姚 2 次地震和吉林汪清 2 次地震的波动形态均不相同,波动形态满足相似性特征的有 2 组。统计结果表明,前驱波持续时间相似性较差、波动幅度在一定范围内重现性较强、波动形态仅在部分地震前具有相似的特征。

表 2 重复地震前前驱波特征比较

序号	地震时间 (年-月-日)	经度 (°)	纬度 (°)	地点	震级	距离发 震时间 (h)	持续时间 (h)	周期 (min)	最大波 动幅度 (mm)	备注
1	1999-03-20	-177.9	51.4	阿留申群岛	7.0	6.17	3.75	40	3	形态相似
	2003-03-18	-177.9	51.6	阿留申群岛	7.2	130.77	9.0	40	3	
2	2003-07-21	101.2	26.0	云南大姚	6.2	8.68	7.0	50	4	形态不同
	2003-10-16	101.3	26.0	云南大姚	6.1	5.8	0.33	20	2	
3	2003-03-12	77.4	39.5	新疆伽师	5.8	51.78	6.67	10	3	形态相似
	2003-05-04	77.3	39.4	新疆伽师	5.8	11.92	10.0	10	6	
4	1999-04-08	130.3	43.4	吉林汪清	7.0	4.76	0.5	20	2.5	形态不同
	2002-06-29	130.6	43.5	吉林汪清	7.2	10.15	9.83	30	18	

综上所述,相似地震前前驱波在一定的时间段和周期范围内具有较强的重现性,部分相似地震前前驱波的波动幅度在一定范围内比较接近,个别相似地震前前驱波形态相似。但在研究范围内尚未发现相似地震前前驱波的起始时间、持续时间、波动周期、波动幅度和波动形态均相似的地震。

### 3 影响井水位前驱波重现性的原因

如前所述,山西静乐井水位震前有前驱波记录的达 35.9%,重现性较强的前驱波的组数占至少 1 次地震前有驱波记录的相似地震组数的 63.1%,但是对于重现性较强的前驱波

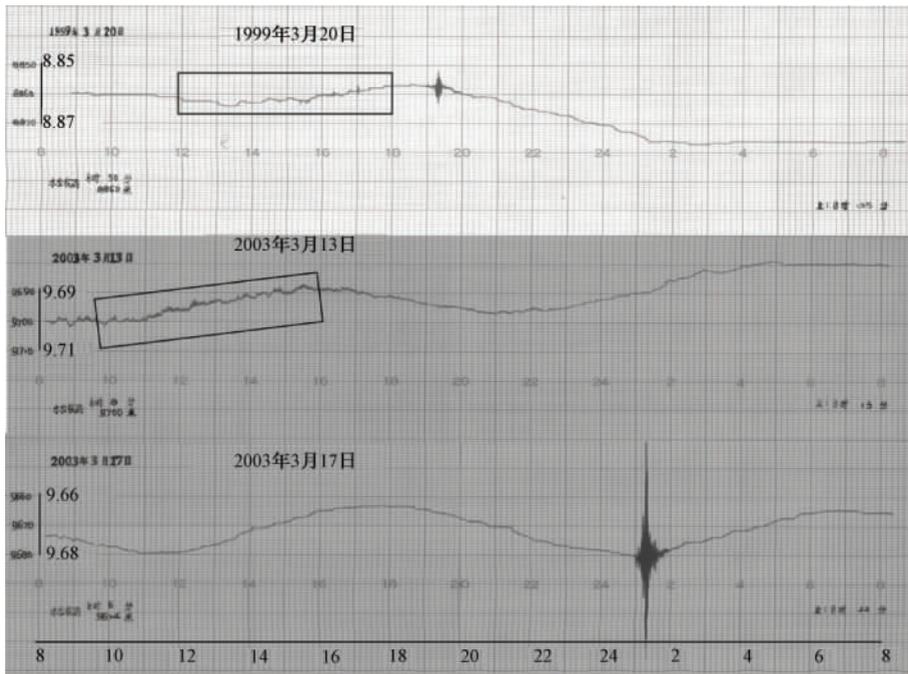


图3 1999年3月20日阿留申群岛7.0级、2003年3月18日7.2级地震前驱波对比图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

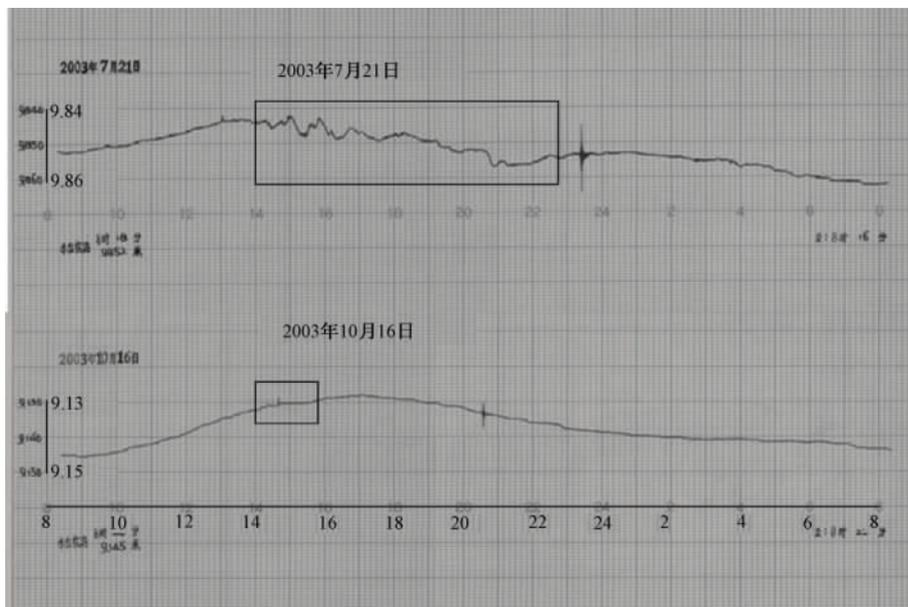


图4 2003年7月21日云南大姚6.2级、2003年10月16日6.1级地震前驱波对比图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

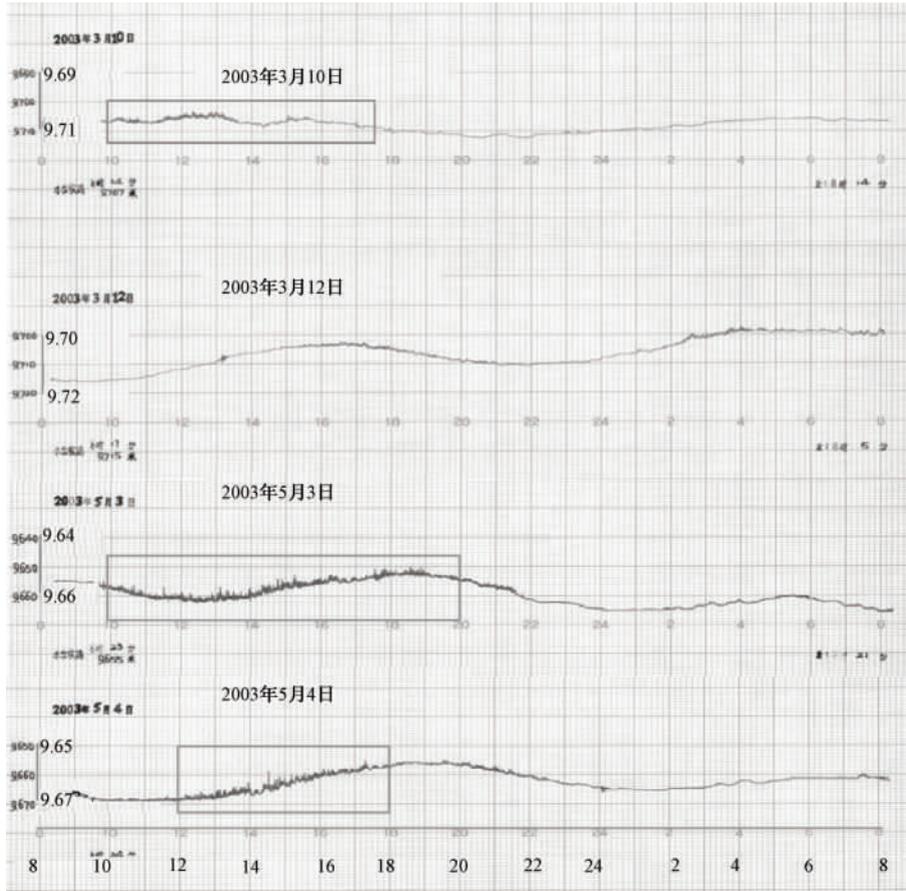


图5 2003年3月12、5月4日新疆巴楚、伽师间2次5.8级地震前前驱波对比图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

也只是在一定的时间段和一定的周期范围内具有重现性,没有一组相似地震前驱波的起始时间与波动周期是完全相同的。除此之外,地点相同、震级相近的地震前均有前驱波记录的比例仅为统计时段内相似地震总数的27.8%,相似地震前前驱波也只有部分特征相似。那么,造成这种现象的原因是什么呢?我们知道前驱波是地震短临前兆之一,其映震机理是否也与前兆异常有相似之处?本文讨论的相似地震仅具备地点相同、震级相近的特点,而这些地震的孕震过程与震源机制是否也具相似性呢?本文将从前驱波产生的机理及传播途径、相似地震的震源特征等方面对井水位前驱波重现性问题进行探讨。

### 3.1 前驱波形成机制对前驱波特征的影响

关于前驱波生成机理,越来越多的学者倾向于最早由冯德益等人提出来的震源断层预滑移成因的观点。冯德益等(1984)利用断裂力学理论,研究了震前长周期形变波的波动源,认为震前地壳内的长周期形变波可能由断层预滑或断裂预扩展产生,其周期范围一般为几十秒~几个小时。断裂预扩展对应着突然加压,并持续较长的时间,在波动源区外围邻近介质中传播的长周期波近似具有“阶跃”形,而远区介质中传播的长周期波则具有振幅迅速

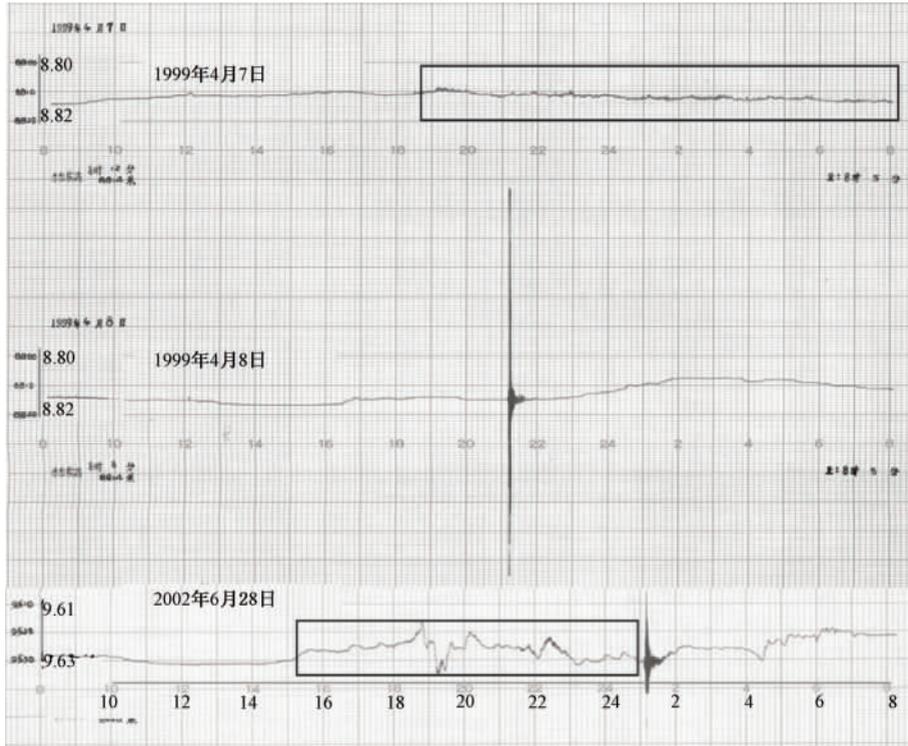


图6 吉林汪清 1999年4月8日7.0级、2002年6月29日7.2级地震前驱波对比图  
横坐标为时刻;纵坐标为水位,单位为米

衰减的“振动形”(冯德益等,1984)。其次是马胜利等(2003)进行的均匀和非均匀断层滑动失稳成核过程的实验,实验结果表明,非均匀标本粘滑失稳由两种不同性质的波组成。首先是振幅很小、周期较长的弹性波从断层上部向下部传播,然后是振幅较大的短周期弹性波从断层中间向两侧传播,这种长周期的弹性波所揭示的是动态破裂开始时相对较慢的破裂过程,是一种典型的破裂成核相;非均匀标本失稳前预滑现象非常明显,失稳前约20s便出现了预滑,尽管其间滑动速率并不均匀,但失稳前预滑逐渐加速的现象十分明显。显然,以低频、小振幅波形为特征的成核相的产生与断层的高速预滑相关。李世愚等(2000)的实验结果表明,震源部位的激发介质特性对冲击振动频率有着重要作用,柔性介质的冲击振动频率远低于脆性介质。

上述理论与实验均表明孕震断裂在破裂前的预扩展会产生长周期波,断裂预扩展过程与孕震区积累的应变能大小及孕震断裂介质不均匀程度等有关。由于不同地震孕震断裂所积累的应变能的大小、断裂预扩展速度以及孕震断裂介质的不均匀程度等各不相同,因此,可能造成不同地震前驱波的波动幅度、波动形态和波动周期上的千差万别。

### 3.2 前驱波传播过程对前驱波特征的影响

冯德益等(1984)利用流变介质中波的传播理论对前驱波传播的一些主要特征进行了分析,认为长周期形变波具有较明显的频散特性,其衰减系数也较强烈地依赖于频率,因而在传播过程中其波形要不断发生变化。临震前震源处出现预滑是低频前驱波产生的原因之

一,但预位移量很小,它很难直接引起较明显的低频前兆变化。郭增建等(1979)认为过热液体的暴沸是震前预位移和前震活动的放大器。这是由于浅源大地震的震源顶部可能达及地表或接近地表,而地表沉积层基底一般是富含水的,它以曲折的通道与地表相通。由于这些通道位于地下深处,地面的扰动不易影响它,因此这里的液体可认为处于相对静止状态。另一方面沉积岩的传热性能差,所以深部上来的热流有可能在沉积基底聚热,并使这里的水达到过热状态(即超过沸点而不沸腾)。由于过热状态的液体是极不稳定的,一旦震源区有变动,如预滑引起的运动,就可能触发过热液体暴沸。预滑放出的波能约为主震时的十万分之一,预位移时断层面上质点位移速度与断裂传播速度成正比。因此,当预位移很慢时,预位移的传播速度也很慢。尽管预位移产生的弹性波能量不大,但由于预位移时质点运动的速度较慢,周期较大,波长较长,因此它向外传播时吸收较小,传播得较远。苏昉等(2002)认为地震前地壳内应力积累到一定程度,在微裂过程中应力释放,辐射弹性波,当此弹性波传播到地表时,向大气中辐射声波,压迫地面上的空气层,引起压力变化产生声波。根据声学理论基础估算,土壤中1个大气压的波动透射到空气中将引起145Pa的声波。因此,地壳内微破裂所产生的长周期波完全可能透射到地面大气层中。由于热传导和粘滞吸收均与频率的平方成正比,故频率越低,吸收越小,对1Hz以下的地震前兆次声波,吸收效应几乎可略去不计。大气中的声波对次声波传播也起积极作用,强地震的前兆次声波因其振幅较强,很有可能进入大气下声道,从而传到更遥远的地方。楼海等(2006)认为断层围陷波是低频前驱波传播的另一个通道。断层围陷波是沿断层带内部传播的Love型面波,是围陷波在低速断层带和高速围岩之间的边界上的多次反射波相干叠加所产生的。断层围陷波起源于多次反射的相干叠加,因而其优势频率必然与断层带的宽度及其内部介质的速度有关。断层带越宽,或断层带内部介质速度越低,则观测到的断层围陷波的优势频率越低。由于破坏性地震常常发生在断层带上,断层作用使地壳发生变形,导致岩石的岩性、孔隙压力和地震波速度的变化。断裂带内部的速度都低于外部的速度,显示了沿断层传播的围陷波的频散特征,即围陷波的低频部分比高频部分传播得快。李松林等(2005)认为无论是人工地震震源还是天然地震震源,只要位于断层带内或紧靠断层带,均能激发断层围陷波;断层围陷波的能量主要集中于断层带内,其振幅随测点与断层带距离的增加而急剧衰减;断层围陷波的优势频率与断层的宽度及断层带内介质的速度有关,断层带越宽或断层带内部介质速度越低,则观测到的断层围陷波的优势频率越低;断层围陷波存在着频散现象。张碧星等(1998,2002)认为层状介质地层中的导波更具特色,它传播远、抗干扰能力强;不仅携带了较多的地层信息,而且能够较容易地被激发和接收。在实际的层状介质地层中,特别是地表下出现低速层时,除这种模式波外,还存在陷模波,这种陷模波往往对应于沿着地表下某一层面的延伸方向传播的导波。Johnson等(1987)在科罗拉多完成的跨井实验研究中发现井孔中(包括发射井和接收井)的斯通利波和沿地表下低速层中传播的导波可以相互转化,它们是强烈地耦合在一起的;沿低速地层传播的导波是耦合在井孔中的斯通利波的主要机制。

由于低频前驱波的传播过程与其频率特性和传播通道的介质特性密切相关,而目前已知的传播通道均具有频散现象,并且不同介质特性具有不同的频散特征。因此,我们所观测到的低频前驱波叠加了不同频率成分,从而表现出不同地震前前驱波的波动周期与波动形

态之间的差异。

### 3.3 震源特征对前驱波重现性的影响

由于前驱波的成因与震源过程有关,是大地震断层的大破裂之前(或后)的慢破裂产生的。因此,讨论前驱波的重现性问题应该考虑与大震震源有关的一些问题。而目前能够反映震源特性的主要有震源机制解、震源深度等。表3列出了震前均有前驱波记录的4组震中位置完全重合、震级差 $\leq 0.2$ 地震的基本参数和震源机制解等数据。由表3可见,4组相似地震的震源机制解、震源深度均不相同,即使震中位置完全重合,震级相同地震的震源特性也有差异。不同的震源特征反映了不同的震源破裂方式。

表3 4组重复地震震源机制解

序号	地震时间 (年-月-日)	经度 (°)	纬度 (°)	地点	震级	震源 深度 (km)	节面 A			节面 B			T轴			N轴			P轴		
							走向 (°)	倾角 (°)	倾俯角 (°)	走向 (°)	倾角 (°)	倾俯角 (°)	Val	PLG	AZ	Val	PLG	AZ	Val	PLG	AZ
1	1999-03-20	-177.9	51.4	阿留申群岛	7.0	43	62	63	76	272	30	116	2.68	69	304	0.09	13	69	-2.77	17	163
	2003-03-18	-177.9	51.6	阿留申群岛	7.2	27	60	75	73	289	22	137	4.07	57	308	0.28	16	64	-4.35	28	163
2	2003-07-21	101.2	26.0	云南大姚	6.2	15	291	84	-170	200	80	-6	0.85	3	65	0.02	78	321	-0.87	11	155
	2003-10-16	101.3	26.0	云南大姚	6.1	33	108	89	-178	18	88	178	3.07	1	243	-0.38	88	135	-2.69	2	333
3	2003-03-12	77.4	39.5	新疆伽师	5.8	15	85	58	101	245	33	73	3.57	74	24	1.28	9	259	-4.85	13	167
	2003-05-04	77.3	39.4	新疆伽师	5.8	15	218	89	37	308	53	-179	5.89	24	269	-0.45	53	36	-5.45	26	166
4	1999-04-08	130.3	43.4	吉林汪清	7.0	575.4	189	82	67	81	25	160	5.43	48	75	-0.71	23	193	-4.72	33	299
	2002-06-29	130.6	43.5	吉林汪清	7.2	581.5	192	77	86	27	13	105	12.1	58	97	-1.88	3	192	-10.2	32	285

为了进一步说明震源特征对前驱波的影响,本文以云南大姚2003年7月21日6.2级、10月16日6.1级地震为例,对相似地震前驱波特征的差异性做进一步的探讨。

2003年7月21日、10月16日,在云南省大姚县境内相继发生6.2级、6.1级地震,两次地震的微观震中分别为 $25.95^{\circ}\text{N}$ 、 $101.23^{\circ}\text{E}$ 和 $25.92^{\circ}\text{N}$ 、 $101.30^{\circ}\text{E}$ 。国内一些学者认为这两次地震为重复地震(周龙泉等,2009),但两次地震震源特性存在明显差异:①震源处环境应力值存在差异。6.2级地震序列平均环境应力值为3.3MPa,存在大于15MPa的高应力地震,而6.1级地震序列平均环境应力值为2.8MPa,无大于15MPa的高应力地震;6.2级地震序列的环境应力值随时间不衰减并伴有高剪应力地震发生,而6.1级地震序列环境应力值衰减较快;6.2级地震序列环境应力值在主震震源深度附近的4~10km分布较为均匀,而6.1级地震序列环境应力值在主震震源深度附近则出现集中、密集现象(钱晓东等,2005)。②震源体的破裂方式存在差异。大姚6.2级、6.1级地震的破裂区都位于倒三角形低速体的东南侧,6.2级地震沿高、低速交界带往下破裂,而6.1级地震沿高、低速交界带往上破裂(周龙泉等,2009)。③震源机制解存在差异。6.1级地震是6.2级地震在同一断层向东南端延伸的另一次破裂。6.2级地震主要以走滑和倾滑型为主,6.1级地震主要以走滑型为主,6.1级地震序列震源机制的系统聚类与6.2级地震序列有一定的差别,可能与6.1级地震的主震震源机制解比6.2级地震主震震源机制解非剪切成分大有关(Wang et al,2009)。

上述结果表明,云南大姚2003年7月21日6.2级、10月16日6.1级地震虽具重复地震的特点,但两次地震环境应力值、震源破裂方式、震源机制解等均存在不同程度的差异。这些差异可能是从不同角度反映了两次地震孕震过程的差异。如前所述,前驱波的成因与

震源过程有关,因此,不同的震源过程有可能产生不同特征的前驱波。实际观测结果也证明如此,山西静乐井水位在大姚 6.2 级地震前约 9 小时(7 月 21 日 14 时 20 分)记录到前驱波,而 6.1 级地震则在震前 6 小时(10 月 16 日 14 时 40 分);6.2 级前驱波持续时间约为 7 小时,6.1 级地震则为 4 小时;6.2 级地震前驱波波动周期约为 50 分钟,6.1 级地震则为 20 分钟;6.2 级地震前驱波最大波动幅度为 4mm,6.1 级为 2mm;6.2 级地震前驱波形态类似正弦曲线,6.1 级则呈阶变形态。两次地震震前前驱波所表现特征存在明显差异。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

通过对静乐井强震前前驱波重现性问题的探讨,初步得出以下结论。

(1)对地壳应力-应变响应能力较强的山西静乐水位观测井而言,强震前有前驱波记录的达 35.9%。

(2)在统计时段有 29 组相似地震,其中震前均有前驱波记录或至少 2 次震前有前驱波记录的相似地震有 12 组,占相似地震总组数的 41.4%。

(3)相似地震前井水位前驱波也在一定的时间和周期范围内具有较强的重现性特征,19 组有前驱波记录的相似地震中,重现性强的有 12 组,达 63.1%;对于震级差 $\leq 0.2$ 、震中地理坐标几乎完全重合的部分相似地震前前驱波也存在波动形态和幅度相似的特征,但在研究范围内尚未发现相似地震前前驱波的起始时间、持续时间以及波动的周期、幅度、形态均相似的地震。

### 4.2 讨论

由于低频前驱波研究的最终目的是解决强震短临预测问题,即对发震时间、发震地点和震级进行预测。从目前所报道的大量前驱波震例资料来看,前驱波一般出现在震前数小时~十天范围内,具有发震时间预测意义,但是要解决前驱波与未来发震地点和震级之间的关系至今仍是一个难题。本文从相似地震前驱波所表现的特征是否具有重现性入手,探寻前驱波对强震发生地点预测的途径,但所得结论仍存在许多不确定性。首先,不是所有相似地震都有前驱波记录,相似地震前均有前驱波记录的也只占到相似地震总组数的 27.6%;其次,是有前驱波记录的测点其后并不一定伴随地震发生,其占前驱波总数的 41.6%;最后,从具有重现性的前驱波特征来看,尚未发现所有特征基本相似的例子。

究其原因,如下:①孕震断裂在破裂前的预扩展会产生长周期波,断裂预扩展过程与孕震区积累的应变能大小及孕震断裂介质不均匀程度等有关。由于不同地震孕震断裂所积累的应变能的大小、断裂预扩展速度以及孕震断裂介质的不均匀程度等各不相同,因此,可能造成不同地震前前驱波的波动的幅度、形态和周期的不同。②由于低频前驱波的传播过程与其频率特性和传播通道的介质特性密切相关,而目前已知的传播通道均具有频散现象,并且不同介质特性具有不同的频散特征。因此,我们所观测到的低频前驱波叠加了不同的频率成分,从而表现出不同地震前前驱波的波动周期与形态之间的差异。③重复地震前震源区的环境应力值、震源破裂方式、震源机制解结果等均存在不同程度的差异,这些差异可能是从不同角度反映了两次地震孕震过程的差异。因此不同的震源特征有可能产生不同特征的前驱波。

正是由于前驱波的复杂性,因此对其产生的物理机制、地质构造背景、运动学和动力学特征、及其与后续地震活动性的关系等问题尚不清楚。除此之外,受我国地震仪频带范围、台网布局、台站密度、观测手段和数据等方面的限制,缺乏对地震学和大地测量学结合研究的成果,目前对前驱波的识别、力学机制等问题仍存在争议,还难以把前驱波应用到解决发震地点与震级大小的地震预测实践中。

近十多年来,随着国内外宽频带数字地震台网、高采样率数字前兆台网、连续 GPS 台网观测手段的广泛应用,大量的前驱波现象被不同的观测手段所记录。因此,利用多学科前驱波记录数据及其所表现的特征来研究地震短临预测问题,对提高前驱波的科学认识具有重要意义。

## 参考文献

- 车用太、鱼金子、张淑亮等,2002,山西朔州水位的“前驱波”记录及其讨论,地震学报,24(2),214~215。
- 冯德益、潘琴龙、郑斯华等,1984,长周期形变波及其所反应的短期和临震地震前兆,地震学报,16(1),41~57。
- 郭增建、秦保燕,1979,大震前予位移的讨论,西北地震学报,1(2),34~40。
- 陈运泰译,1992,1960年5月22日智利大地震的震源过程,国外地震,(2):30~36。
- 李世恩、滕春凯、卢振业等,2000,典型构造微破裂集结的实验研究,地震学报,22(3),278~286。
- 李松林、张先康、樊计昌,2005,利用断层围陷波研究昆仑山口西8.1级地震破裂面,地震学报,27(1),42~50。
- 楼海、王椿镛、丁志峰等,2006,昆仑山断层围陷波的分析,地球物理学报,49(3),788~796。
- 马胜利、刘力强、马瑾等,2003,均匀和非均匀断层滑动失稳核过程的实验研究,中国科学,33(增刊),45~52。
- 钱晓东、秦嘉政、叶建庆,2005,2003年大姚 $M_s$ 6.2、 $M_s$ 6.1地震序列环境剪应力0值时空分布,地震地磁观测与研究,26(2),75~81。
- 苏昉、田维,2002,2000年7~9月强地震的前兆次声波测量研究,地震研究,25(1),11~19。
- 王庆良、张晓东、崔笃信等,2005,理解前兆异常变化机理和地震短临前兆,国际地震动态,(5),131~144。
- 张碧星、鲁来玉,2002,层状半空间中导波的传播,声学学报,27(4),295~304。
- 张碧星、喻明、熊伟等,1998,多层介质地层中有低速层出现时的陷模研究,中国有色金属学报,8(2),340~346。
- 张淑亮、李冬梅、范雪芳,2005,井水位前驱波与气压、风、降雨及强震关系的分析,地震,25(3),69~77。
- 周龙泉、刘杰、马宏生等,2009,2003年大姚6.2级、6.1级地震序列震源位置及震源区速度结构的联合反演,地震,29(2),12~24。
- Johnson P A, Albright J N, 1987, In: Proceedings of SEG 57th Annual International Meeting, 22~27.
- Poupinet G, Ellsworth W L, Frechet J, 1984, Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras Fault, California, J Geophys Res, 89(B7), 5719~5731.
- Wang X S, Feng X D, Diao G L, et al, 2009, Difference between focal mechanisms of Dayao earthquake doublet sequence, Earthq Sci, 22, 667~673.

## Discussion about the reproducibility problem of Jingle well water level precursors

*Zhang Shuliang*<sup>1,2)</sup> *Liu Ruichun*<sup>1,2)</sup> *Lv Fang*<sup>1,2)</sup>

1) Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China

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

**Abstract** Choosing the Jingle well in Shanxi as the research object, the paper discusses the reproducibility problem of well water level precursor waves. The results show that the start time and fluctuation cycle before similar earthquakes are highly reproducible, the ratio of which is up to 63.1%. The fluctuation form and amplitude before some similar earthquakes are of certain similarity, but the earthquakes with all similar precursor features were not found in the research scope. The reason may be related to origin and transmission route of the precursor wave as well as seismic zone characteristics of the similar earthquakes.

**Key words:** Precursor waves Earthquake Well water level Reproducibility