

张淑亮、吕芳、李斌, 2011, 井水位前驱波普遍性问题的探讨, 中国地震, 27(4), 348 ~ 362。

· 研究论文 ·

井水位前驱波普遍性问题的探讨

张淑亮^{1 2)} 吕芳^{1 2)} 李斌^{1 2)}

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, 太原市晋祠镇北门外 030025

摘要 以山西、河北、内蒙等地 5 口映震能力较强的地下水位观测井为研究对象, 对井水位前驱波普遍性问题进行了探讨。结果表明, 强震井水位前驱波现象较为普遍, 其比例可达 65.1% (41/63); 相同地震不同观测井前驱波特征各不相同, 同一观测井在不同地震前的特征也各异, 这可能与不同观测井具有不同的井-含水层结构以及不同地震前有着不同的震源参数有关; 与单井水震波相比, 震前有前驱波记录的次数略低于水震波, 其比例在 39.7% ~ 50.7% 之间; 震前有前驱波记录的观测井占研究区观测井总数的比例可达 66.7%。

关键词: 前驱波 地震 井水位 普遍性

[文章编号] 1001-4683(2011)04-0348-15 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 前言

地震前驱波现象最早是由 Kizawa(1972) 在 GS12 型重力仪光电记录上发现的。1964 年 3 月 28 日美国阿拉斯加大地震和 1964 年 6 月 16 日日本新潟地震前 3 天, 有一系列特殊脉动叠加在重力固体潮曲线上, 并一直持续到大震发生。之后国内外不断有类似前驱波现象的报导(冯德益等, 1984; 吴忠良, 2001; 车用太等, 2002; Kanamori 等, 1974; Monastersky, 1994), 且广泛出现在重力、地倾斜、应变、水位及宽频数字地震等多种观测资料中。近年来, 国内外一些学者对其进行了大量的探索, 极大地提高了前驱波与地震之间关系的认识, 低频前驱波异常因其物理意义逐渐明确、干扰影响因素少, 更被认为是具有重要预测价值的可靠短临前兆信息(郭增建等, 1996; Dieterich, 1992; Rice, 1993; 李世愚等, 2000; 刘万琴等, 1999; 张淑亮等, 2005、2006)。

虽然低频前驱波出现在多种观测资料中, 但多是单台或单手段记录, 对一种仪器记录到的前驱波事件不能从其他台站或其他观测手段进行佐证, 因此低频前驱波一直没有引起足够的重视和应用于实际短临预测工作中。本文对 2003 年全球 20 次 7 级以上地震和全国 43

[收稿日期] 2011-06-07

[项目类别] 地震科学联合基金(A08051)、山西省科技攻关项目(2006031106、20090311084)、山西省自然科学基金(2011011027)、2011 震情跟踪工作项目(2011011401) 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

次 5 级以上地震(不含 7 级以上地震)前山西、内蒙、河北等地映震能力较强的井水位前驱波现象进行了统计,并对强震前井水位前驱波的普遍性、前驱波所表现的特征以及影响前驱波响应能力的主要因素等问题进行了初步探讨,取得一些新的认识。

1 前驱波识别标志

研究井水位前驱波现象,最基础的问题应是前驱波的识别。如何从地震前兆观测资料中识别出低频前驱波,是低频前驱波现象研究的重要问题。国内外一些学者在大量研究工作的基础上提出了各自的认识。车用太等(2002)认为井水位前驱波一般出现在强震前几至十几小时,幅度为几至几十毫米,形态是以周期几分钟为主的快波动和周期几十分钟的慢波动或慢波动叠加有快波动;冯德益等(1984)认为长周期形变波的周期范围一般为几十秒至几小时,出现在主震 P 波前直到数天前的很宽的时间范围内,形态以阶跃形和波动形为主;王庆良等(2005)认为低频前驱波在原始记录上的典型表现为脉动变粗,一般出现在震前数小时至 7 天左右,周期为数秒,可以传播数百至上千千米,小至 5 级左右中强震,大至 8 级以上巨震基本上都可以观测到前驱波现象。

本文根据不同观测手段监测到的低频前驱波所表现的特征,归纳出井水位低频前驱波的识别标志,即:震前几小时至 7 天左右,周期为数分钟至数十分钟,幅度为几至几十毫米的波动,形态以脉动变粗、阶跃型、脉冲波动、正弦波动等为主。

2 井水位前驱波现象统计

震例研究表明,山西朔州井、山西静乐井、河北唐山矿井、内蒙丰镇井、内蒙兴和井的水位在 1989 年大同 6.1 级、1996 年包头西 6.4 级和 1998 年张北 6.2 级等华北北部 3 次强震前有异常显示的比例均在 75% 以上(表 1)。5 口观测井对华北北部地区强震有较强的映震能力。本文以这 5 口井为研究对象并对 2003 年各观测井所记录前驱波信息、前驱波与地震对应情况、同一地震不同观测井的记录情况等进行了统计。

表 1 华北北部地区 3 次 6 级强震前 5 口观测井异常一览表

测点名称	测项	大同-阳高 6.1 级地震	包头西 6.4 级地震	张北-尚义 6.2 级地震
山西静乐井	水位	1988-07 ~ 1991-09 高值	1995-07 ~ 1997-12 高值	1995-07 ~ 1997-12 高值
山西朔州井	水位	1987-07 ~ 1993-05 高值	1995-08 ~ 2001-06 高值	1995-08 ~ 2001-06 高值
河北唐山井	水位		1995-07 ~ 1997-12 高值	1995-07 ~ 1997-12 高值
内蒙丰镇井	水位		1995-11 ~ 1998-02 突升高值	1995-11 ~ 1998-02 突升高值
内蒙兴和井	水位		1995-07 ~ 1997-12 高值	1995-07 ~ 1997-12 高值

2.1 不同观测井前驱波记录次数及其与地震对应情况

2003 年全球共发生 7.0 级以上地震 20 次,中国大陆发生 5.0 级以上地震 43 次(不含 7 级以上地震)。表 2 给出了 5 口观测井前驱波记录次数、前驱波与地震的对应关系等信息。

由表 2 可知,前驱波对应地震百分比最高的为内蒙丰镇井的 96.3%,最低为内蒙兴和井的 76.5%;震前有前驱波记录次数与统计时段内发生地震总次数的比例最高的为山西静乐井 50.8%,最低为内蒙兴和井 20.6%。

表 2 5 口观测井对地震波及前驱波记录次数统计表

观测井名称	前驱波记录次数	对应地震次数	对应地震的比例(%)	对应地震次数占地震总次数的比例(%)
山西静乐井	35	32	91.4	50.8
山西朔州井	27	25	92.6	39.7
河北唐山井	35	30	85.7	47.6
内蒙丰镇井	27	26	96.3	41.3
内蒙兴和井	17	13	76.5	20.6

2.2 同一地震不同观测井前驱波记录情况

在所选的 63 次地震中,有 41 次地震前记录到前驱波信息,其中 5 口观测井均有前驱波记录的 4 次,占地震总次数的 6.3%,占前驱波总次数的 9.8%; 4 口观测井有前驱波记录的 15 次,占地震总次数的 23.8%,占前驱波总次数的 36.6%; 3 口观测井有前驱波记录的 6 次,占地震总次数的 9.5%,占前驱波总次数的 14.6%; 2 口观测井有前驱波记录的 12 次,占地震总次数的 19.0%,占前驱波总次数的 29.3%; 仅 1 口井有前驱波记录的地震 4 次,占地震总次数的 6.3%,占前驱波总次数的 9.8% (表 3)。

表 3 同一地震不同观测井前驱波记录情况统计结果

记录前驱波的观测井数及地震次数	地震三要素 (震前有前驱波记录)	井震距(km)				
		静乐井	朔州井	丰镇井	兴和井	唐山井
5 口井同时记录到前驱波的地震(4 次)	2003-03-12 新疆伽师 5.9 级	2980	2990	3040	3080	3490
	2003-05-04 新疆伽师 5.8 级	2980	2990	3040	3080	3490
	2003-08-04 大西洋 7.5 级	17000	17100	17200	17300	17400
	2003-08-16 内蒙科尔沁旗 5.9 级	900	790	670	600	500
4 口井同时记录到前驱波的地震(15 次)	2003-03-31 新疆伽师 5.2 级	2980	2990	3040		3490
	2003-04-17 青海德令哈 6.6 级	1340	1390	1450		1870
	2003-05-15 台湾东北海域 5.0 级	1750	1830	1900		1650
	2003-05-26 日本仙台近海 7.0 级	2590	2530	2460		2040
	2003-06-05 新疆伽师 5.2 级	2980	2990	3040		3490
	2003-06-10 台湾花莲以东海域 6.0 级	1870	1940	2020		1800
	2003-07-07 西藏、青海交界 6.1 级	2050	2110	2180		2590
	2003-07-21 云南大姚 6.2 级	1700	1810	1940		2180
	2003-09-01 中俄交界 6.0 级	1800		1630	1600	1260
	2003-09-22 缅甸 7.2 级	2610	2730		2900	3100
	2003-09-26 日本北海道 8.0 级	2740	2660	2580		2200
	2003-10-16 云南大姚 6.1 级	1700	1810		2000	2180
2003-10-31 日本本州近海 7.1 级	2690		2560	2500	2140	
2003-12-01 哈萨克斯坦与中国交界 6.1 级	2730		2730	2800	3180	
2003-12-26 伊朗南部 7.0 级	4980	5020		5100	5510	
3 口井同时记录到前驱波的地震(6 次)	2003-02-24 新疆伽师 6.8 级	2980		3040		3490
	2003-03-18 阿留申群岛 7.2 级	5200	5100			4700
	2003-09-02 新疆阿克陶 5.9 级		3200	3250		3690
	2003-11-13 甘肃岷县临潭间 5.2 级	830	920			1370
	2003-12-06 科曼多尔群岛 7.1 级	4360		4130	4050	
2003-12-24 东海 5.4 级		1860	1910	1900		

续表 3

记录前驱波的观测 井数及地震次数	地震三要素 (震前有前驱波记录)	井震距(km)				
		静乐井	朔州井	丰镇井	兴和井	唐山井
2 口井同时记录到 前驱波的地震(12 次)	2003-01-20 所罗门群岛 7.5 级	7400	7300			
	2003-01-22 墨西哥哈利斯科州近海 7.5 级	12600	12600			
	2003-02-14 新疆石河子 5.4 级	2290	2290			
	2003-06-20 中智利海岸 7.2 级	19200		18800		
	2003-06-23 拉特群岛 7.0 级			4890		4600
	2003-07-16 卡尔斯伯格地区 7.7 级		6590	6700		
	2003-08-21 新西兰南岛近海 7.3 级			10900		10600
	2003-09-27 俄、蒙、中交界 7.8 级			2230		2650
	2003-10-01 俄、蒙、中交界 7.3 级	2320				2650
	2003-10-25 甘肃省民乐、山丹 6.1 级	950				1480
1 口井记录到前驱波的 地震(4 次)	2003-11-17 拉特群岛 7.6 级			5040		4750
	2003-12-10 台湾台东近海 7.0 级	1910			2100	
	2003-05-27 印尼哈马黑拉岛以北 7.0 级		4400			
	2003-06-17 台湾花莲以东海域 5.1 级	1860				
	2003-11-15 云南鲁甸 5.2 级					1290
	2003-12-18 台湾台东近海 5.0 级	1940				

3 不同观测井前驱波记录特征对比

如前所述,对于映震能力较强的观测井而言,在 65.1% (41/63) 地震前可记录到前驱波信息,那么,这些地震前的前驱波是否具有相同特征? 表 4 给出了同一地震前不同观测井前驱波的起始时间、波动周期和波动幅度等信息,各观测井前驱波的形态特征见图 1~4。

表 4 同一次地震不同观测井前驱波特征比较表

地震名称	观测井名称	起始时间	波动周期(min)	波动幅度(mm)
		(年-月-日 T 时:分)		
2003-03-12T12:47 新疆巴楚、伽师间 5.9 级地震	静乐井	2003-03-02T09:20 ~ 2003-03-05T06:40	30	8
	朔州井	2003-03-02T09:50 ~ 2003-03-02T17:15	25	3
	唐山井	2003-03-01T11:25 ~ 2003-03-02T17:40	65	14
	丰镇井	2003-03-08T14:35 ~ 2003-03-08T14:40	5	5
	兴和井	2003-03-11T09:40 ~ 2003-03-11T15:00	10	14
2003-05-04T23:44 新疆巴楚、伽师间 5.8 级地震	静乐井	2003-04-25T11:40 ~ 2003-04-25T20:00	40	11
	朔州井	2003-04-25T12:00 ~ 2003-04-25T19:50	60	12
	唐山井	2003-04-26T16:50 ~ 2003-04-26T17:40	30	9
	丰镇井	2003-05-01T11:30 ~ 2003-05-01T11:37	7	22
	兴和井	2003-05-01T08:00 ~ 2003-05-03T19:40	40	6
2003-08-04T12:37 大西洋 7.5 级地震	静乐井	2003-07-29T23:30 ~ 2003-08-03T01:45	50	8
	朔州井	2003-07-29T21:45 ~ 2003-07-30T08:05	30	5
	唐山井	2003-07-26T23:47 ~ 2003-07-27T23:00	50	20
	丰镇井	2003-07-29T15:00 ~ 2003-07-29T15:05	5	24
	兴和井	2003-07-29T21:40 ~ 2003-07-30T03:50	75	6
2003-8-16T18:58 内蒙巴林左旗、阿鲁科尔沁旗间 5.9 级地震	静乐井	2003-08-04T21:30 ~ 2003-08-05T11:55	50	10
	朔州井	2003-08-05T08:40 ~ 2003-08-05T10:30	20	7
	唐山井	2003-08-05T13:45 ~ 2003-08-05T14:50	25	4
	丰镇井	2003-08-07T11:25 ~ 2003-08-07T19:30	30	12
	兴和井	2003-08-05T10:25 ~ 2003-08-05T10:55	40	2

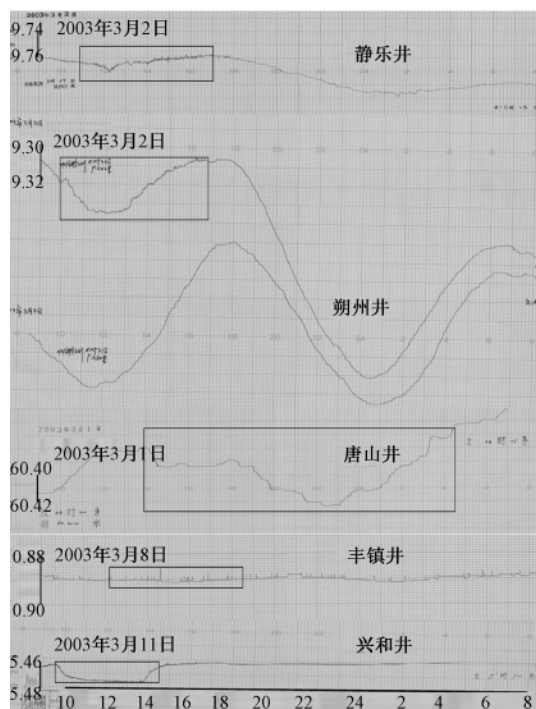


图 1 2003 年 3 月 12 日新疆巴楚、伽师间 5.8 级地震前 5 口观测井前驱波记录
(横坐标为时间,单位为小时;纵坐标为水位,单位为米)

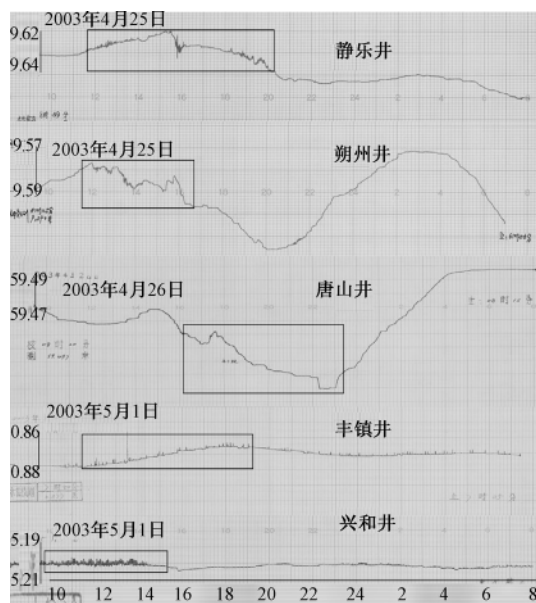


图 2 2003 年 5 月 4 日新疆巴楚、伽师间 5.8 级地震前 5 口观测井前驱波记录
(横坐标为时间,单位为小时;纵坐标为水位,单位为米)

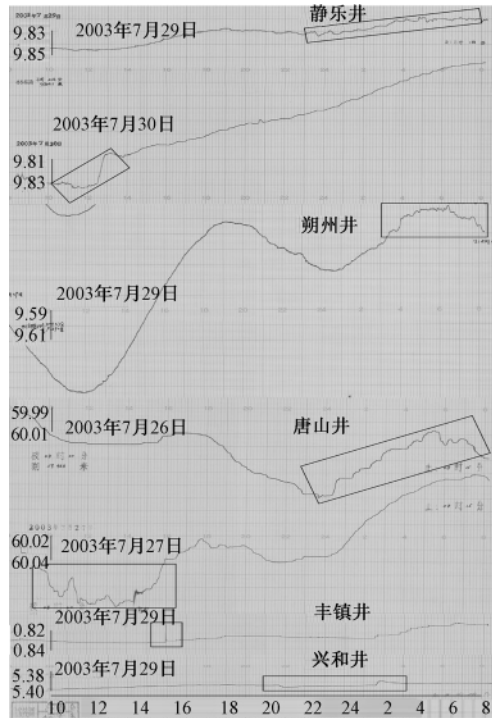


图 3 2003 年 8 月 4 日大西洋 7.5 级地震前 5 口观测井前驱波记录 (横坐标为时间,单位为小时;纵坐标为水位,单位为米)

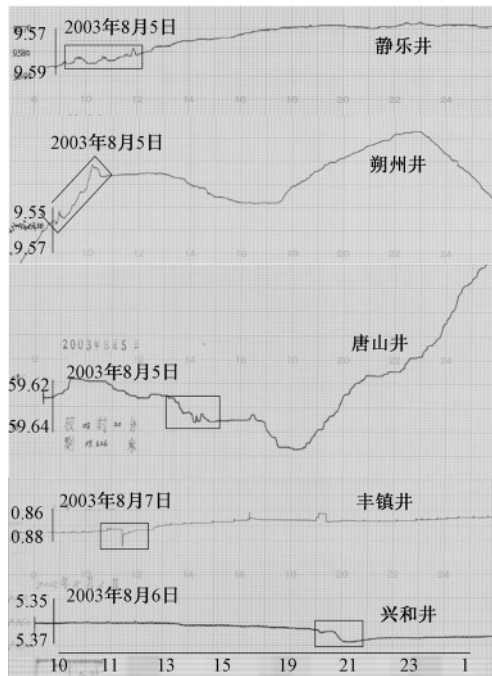


图 4 2003 年 8 月 16 日内蒙巴林左旗、阿鲁科尔沁旗间 5.9 级地震前 5 口观测井前驱波记录 (横坐标为时间,单位为小时;纵坐标为水位,单位为米)

3.1 时间特征

前驱波起始时间分布范围很广,从几分钟至十几天。其中发生在震前7天内的占93%,大于7天的仅占7%。如表4所示,前驱波起始时间有如下3个特点:①同一地震前不同观测井前驱波起始时间不同,最长的为2003年8月16日内蒙巴林左旗、阿鲁科尔沁旗间5.9级地震前12天静乐井的前驱波记录和2003年3月12日新疆巴楚、伽师间5.9级地震前12天唐山井的前驱波记录,最短的为2003年3月12日新疆巴楚、伽师间5.9级地震前1天兴和井的前驱波记录。②多数观测井前驱波起始时间一般出现在震前6~12天,占表4统计数据总数的16/20。这一统计结果与王庆良等(2006)给出的低频前驱波时间特征较为一致,他们认为低频前驱波一般在震前数小时至7天左右出现,其中,相当一部分地震的前驱波会在震前1~3天衰减消失(如2001年昆仑山8.1级地震)。另一些地震的前驱波则会一直持续到地震发生(如1976年唐山7.8级地震)。无论哪种变化类型,低频前驱波都具有数小时至7天的短临预测指标。③同一观测井在不同地震前前驱波的起始时间不同,内蒙兴和井在不同地震前前驱波起始时间最长相差10天,河北唐山井在不同地震前前驱波起始时间最短相差3天。

3.2 周期特征

由表4统计结果可知,同一地震前不同观测井前驱波的波动周期各不相同,周期差值最大为70min(2003年8月4日大西洋7.5级地震前兴和井与丰镇井之差),最小为30min(2003年8月16日内蒙巴林左旗、阿鲁科尔沁旗间5.9级地震前静乐井与朔州井之差);同一观测井在不同地震前的波动周期也各异,前驱波波动周期静乐井为30~50min、朔州井为20~60min、唐山井为25~65min、丰镇井为5~30min、兴和井为10~75min。

3.3 幅度特征

前驱波波动幅度与波动周期具有相似的特点。同一次地震前不同观测井前驱波的波动幅度各不相同(表4),同一观测井在不同地震前的波动幅度也各异。图5为山西静乐井1999~2003年所记录到前驱波的波动幅度与震级之间关系示意图,由图可以看出,前驱波波动幅度最大可达18mm,最小仅为2mm,多数集中在2~6mm,占总数的76.8%。

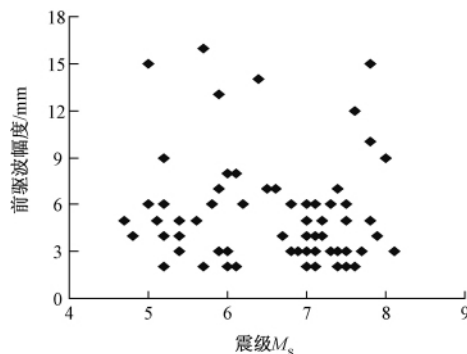


图5 不同地震前静乐井水位前驱波波动幅度图

3.4 形态特征

如图1~4所示,前驱波主要有以下4种形态:①脉动变粗;②正弦波动;③阶变型;④单

脉冲型。其中静乐井以脉动变粗、正弦波动、阶变为主;朔州井、唐山井以脉动变粗、正弦波动为主;丰镇井以单脉冲为主;兴和井以阶变为主。多数地震前静乐井、朔州井所显示形态相近,而丰镇井与兴和井所显示的形态不仅与其他3口井相差较大,而且两口井之间的形态也相差甚远。

综上所述,同一次地震前不同观测井以及不同地震前同一观测井前驱波的起始时间、波动周期、波动幅度、波动形态等各有差异,仅少数地域相近的观测井具有相似特征。前驱波特征的同-性较差。

4 水位前驱波特征及响应能力分析

如前所述,在相同时段、相同震级统计范围内,不同观测井对前驱波的响应能力不同;不是所有地震前都有前驱波记录;相同地震不同观测井前驱波所显示的特征不同;同一观测井在不同地震前所显示的特征也不同。由于不同观测井有着不同的井孔结构和观测环境,同样,不同地震也有着不同的震源特征。那么前驱波的特征是否与井-含水层结构和震源特征有关呢?

4.1 井-含水层结构

Cooper(1965)的研究结果表明,井-含水层系统对压力水头波动信息的放大倍数与井-含水层系统的固有周期 τ_0 、含水层的厚度 d 、渗透系数 K 、导水系数 T 、井孔半径 r_w 等参数有关。井-含水层系统的固有周期与井孔中有效水柱高度 H_e 有关,有效水柱高度与井孔中水柱高度 H 、含水层厚度 d 有关;在井-含水层固有周期一定的情况下,井水位对地壳中波动信息的放大能力还与含水层的导水系数 T 、井的半径 r_w 有关,而导水系数又取决于含水层的渗透系数 K 和含水层的厚度 d ,即

$$\tau_0 = 2\pi \sqrt{\frac{H_e}{g}} \quad (1)$$

$$H_e = H + \frac{3d}{8} \quad (2)$$

$$T = Kd \quad (3)$$

由于前驱波与地震波都是介质弹性波,因此可根据上述理论计算有前驱波记录的井-含水层系统的特征参数。本文通过计算给出了所选择的5口观测井的井-含水层特征参数(表5)。

表5 5口观测井的井-含水层特征参数统计表

井名	井深 (m)	含水层岩性	含水层 厚度(m)	井径 (mm)	井-含水层 固有周期(s)	有效水柱 高度(m)	含水层渗透 系数(m/d)	导水系数	震前有前 驱波记录 的次数
								与井孔半径 平方的比值 (d^{-4})	
静乐井	362.9	O ₂ 灰岩	316.6	128	30.5	231.8	11.5	8.9×10^5	32
朔州井	708.4	O ₂ 灰岩	315.6	147	44.8	498.9	1.2	0.7×10^5	25
唐山井	207.0	O ₂ 灰岩	53.0	127	21.9	119.2	3.6	0.5×10^5	30
丰镇井	98.9	第三系砂岩	11.0	200	20.7	106.4	27.1	0.3×10^5	26
兴和井	149.4	第四系砂砾卵石	10.9	150~170	14.7	49.9			13

由表5可以看出,影响井-含水层前驱波响应能力强弱的主要因素有:井-含水层的渗透系数、固有周期、含水层导水系数与井孔半径平方的比值等。井-含水层的渗透系数、固有周

期、含水层导水系数与井孔半径平方的比值等 3 项数值越大,对前驱波的响应能力越强。这是由于:①含水层的渗透性能越好,对水井振荡时产生的阻尼越小,系统放大倍数也相应地增大,因此井-含水层系统的导水系数与井孔半径平方的比值越大,前驱波响应能力越大。②尽管井-含水层系统的固有周期与前驱波的周期有一定的差异,但与其它水位观测井相比,前驱波记录能力较强观测井的固有周期明显偏大,其值介于地震波周期与气压波动周期之间,对前驱波有一定的共振能力,因此有可能记录到波动周期为数分钟至数十分钟的前驱波信息(车用太等 2002)。但并不是所有观测井都符合这一规律,对于大于 1000s 的周期波动,水柱高度对系统的放大作用影响很小或者没有影响(Bredehoeft,1967),而前驱波引起水位的波动周期多数大于 1000s,虽然此时井-含水层系统的固有周期有可能对前驱波产生一定的共振能力,但这时井-含水层系统的固有周期可能已不是影响前驱波响应能力大小的主要因素。③水井水柱的有效高度越大,前驱波响应能力越大。由于水井水柱的有效高度越大,参与振动的水柱质量就越大,其共振周期就越长(张淑亮等 2006)。④不同岩性含水层中的观测井对前驱波的响应程度差异很大,灰岩含水层观测井对前驱波响应幅度大于其它岩性的含水层,甚至是砂岩含水层的几十倍,这是因为灰岩中的井不但水体相当大,而且含有许多溶洞,使得含水层内水体连通性非常好,因此响应频带宽。水体连通性好能给低频波的传播提供最佳通道,也是井水位在强地震前记录前驱波的必要条件(张淑亮等 2003)。

正是由于不同井孔结构对前驱波的响应能力的不同,才使得不同观测井对同一地震具有不同的响应特征。

4.2 井水位前驱波响应能力与震源参数的关系

不同观测井距震中的距离各不相同,不同地震有不同的震级、震中位置等。那么,井水位前驱波响应能力的大小与震源参数又有着怎样的关系呢?

4.2.1 与震中距的关系

图 6 为 2003 年所选 5 口观测井的前驱波有效观测距离图。由图 6 及表 3 可知,前驱波有效观测距离很宽,从 600 ~ 19200km 范围内均有记录,且主要集中在 1500 ~ 5000km。其中距离小于 5000km 的占表 3 统计数据总数的 83.2%,距离 2000km 以内的占 30.4%,距离 1000km 内的占 6.4%。如表 3 所示,在 41 次震前有前驱波记录的地震中,5.0 ~ 6.9 级地震 22 次,其中井震距在 1 ~ 1000km 范围内的 3 次,1001 ~ 2000km 范围内的 10 次,2001 ~ 3000km 范围内的 8 次,大于 3000km 范围内的 1 次,多数地震集中在 1001 ~ 3000km 的范围内,占地震总数的 81.8% (18/22); 7 级以上地震 19 次,井震距小于 4500km 范围内的 8 次,大于 5000km 的有 11 次,多数地震分布在 5000km 以外,占 7 级以上地震总次数的 57.9%。可见前驱波出现后,1001 ~ 3000km 内发生 5.0 ~ 6.9 级地震的可能性较大,5000km 以外发生 7 级以上地震的可能性较大。

4.2.2 与震级的关系

为了进一步说明前驱波与主震震级的关系,表 6 给出了不同震级范围各观测井前驱波记录次数和百分比,图 7 则为不同观测井震前有前驱波记录的地震震级图。由表 6 和图 7 可以看出,井水位拥有前驱波的主震震级范围很宽,小至 5 级左右,大到 8 级以上。其中 $M \geq 6$ 地震约占 91.6%, $M \geq 7$ 地震约占 59.8%。上述事实表明,大小地震都可能出现前驱波,但以大地震为主。

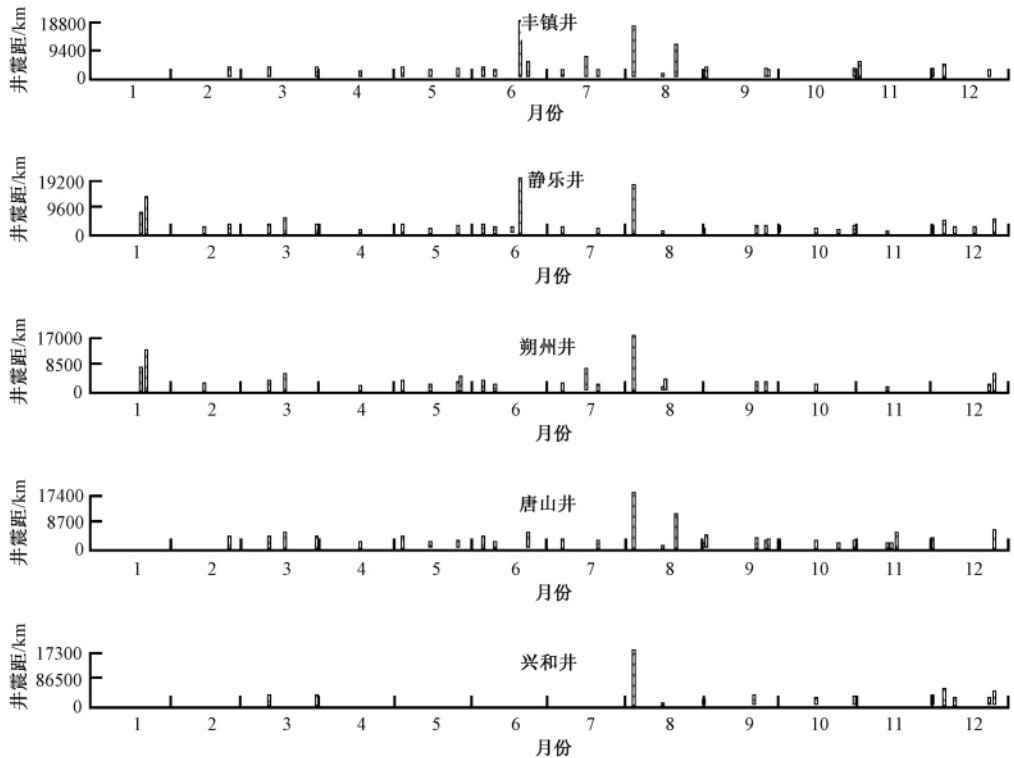


图 6 2003 年井水位前驱波有效观测距离图

表 6 不同震级范围各观测井前驱波记录次数和比例

震级 范围	静乐井		朔州井		丰镇井		兴和井		唐山井	
	次数	比例(%)	次数	比例(%)	次数	比例(%)	次数	比例(%)	次数	比例(%)
5.0~5.9	10	31.3	10	40.0	8	30.8	4	30.8	9	30.0
6.0~6.9	9	28.1	5	20.0	7	26.9	3	23.1	9	30.0
7.0~7.9	12	37.5	9	36.0	10	38.5	6	46.1	11	36.7
8.0~8.9	1	3.1	1	4.0	1	3.8	0	0	1	3.3

4.2.3 与发震地点的关系

图 8、9 给出了 2003 年全球 7 级以上、中国 5.0~6.9 级地震前有前驱波记录的地震的空间分布。由图可以看出,全球 7 级以上地震主要分布在环太平洋地震带的西岸和中国大陆周边地区,约占 15/19;中国地区 5.0~6.9 级地震主要分布在 106°以西及台湾地区,约占 18/22。这种空间分布特征可能与本文所选研究时段内地震的空间分布格局有关。

5 前驱波普遍性问题分析

对地壳应力-应变响应能力较强的观测井而言,强震前井水位同震响应按照地震的大小和远近占到所有观测井的 60%~80% 被视为具有普遍性。如前所述,前驱波与水震波都是介质弹性波,因此井-含水层对水震波与前驱波的响应也应有相同的关系,即水震波记录次

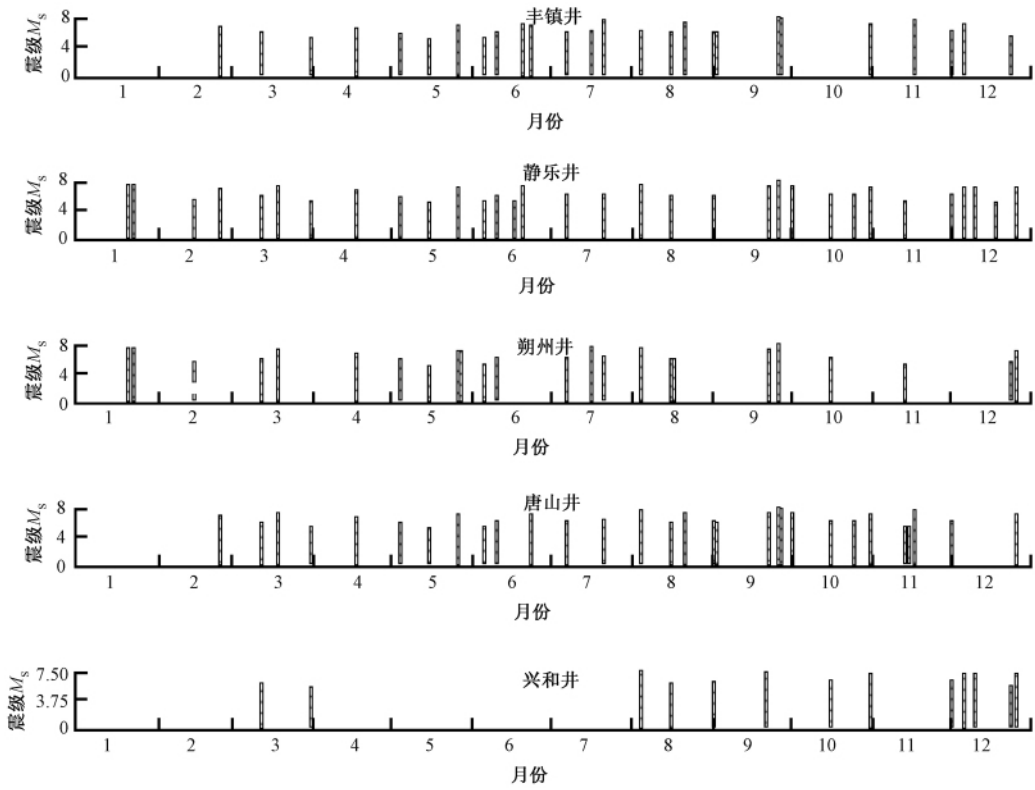


图 7 2003 年不同观测井水位前驱波震级图

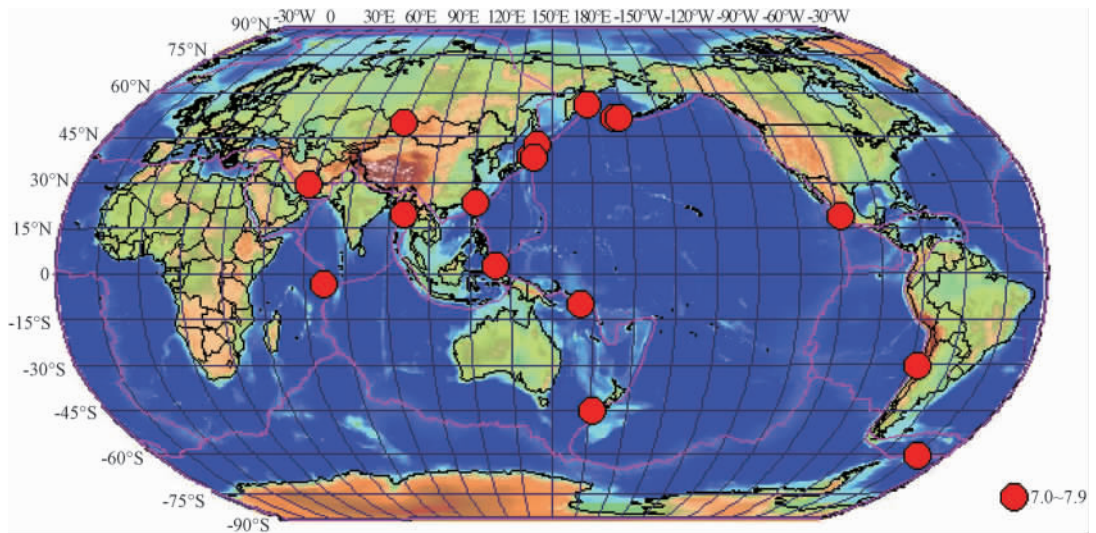


图 8 全球 7 级以上地震前震前有前驱波记录的震中位置图

数越多,水震波前的前驱波记录次数也越多。据此,本文对所选研究对象中水震波与前驱波响应能力较强的 3 口奥陶系灰岩观测井(静乐井、朔州井、唐山井)的相关信息进行了统计,

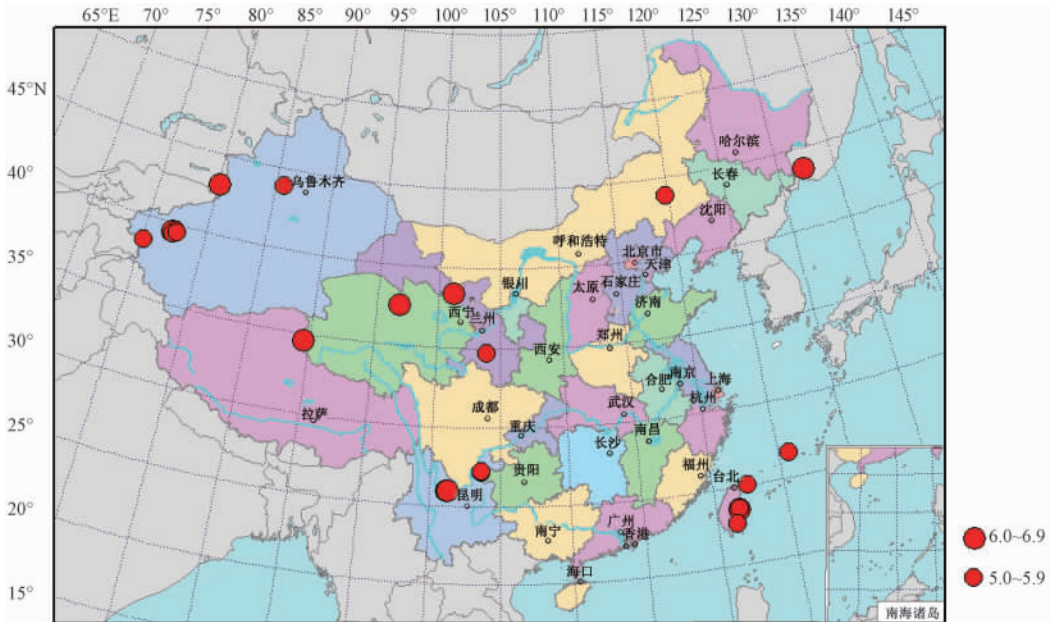


图 9 全国 5 级以上地震前震前有前驱波记录的震中位置图

结果见表 7。

表 7

3 口奥陶系灰岩观测井水震波与前驱波相关信息表

观测井名称	水震波记录次数	前驱波记录次数	有水震波、 前驱波次数	有水震波无前 驱波次数	有前驱波无水 震波次数
静乐井	41	32	27	14	5
朔州井	38	25	19	19	5
唐山井	40	30	30	10	0

由表 7 可知, 3 口观测井水震波记录次数占所选地震总数(63 次)百分比分别是: 静乐井 65.1%、朔州井 60.3%、唐山井 63.5%; 前驱波记录次数占所选地震总数(63 次)的百分比分别是: 静乐井 50.7%、朔州井 39.7%、唐山井 47.6%; 有水震波、前驱波记录次数占所选地震总数(63 次)的百分比分别是: 静乐井 42.9%、朔州井 30.2%、唐山井 47.6%。统计结果表明, 震前有前驱波记录的比例略低于水震波记录, 这可能是由于前驱波源于慢地震, 水震波则源于主震。赵根模等(2001)认为慢地震辐射效率较低, 慢地震所辐射的能量比主震能量小 2~3 个数量级。因此, 主震井水位水震波记录次数要高于震前前驱波记录次数。参照主震井水位水震波同震响应比例在 60%~80% 之间即视为具有普遍性, 并根据慢地震所辐射的能量低于主震的特点, 确定震前井水位前驱波记录在 40%~50% 可视为具有一定的普遍性。由表 2 的统计数据可知, 本文所选 5 口观测井震前有前驱波记录的百分比基本在 39.7%~50.7% 的范围(内蒙兴和井除外), 基本满足强震前前驱波普遍性的条件。

如前所述, 与井水位水震波普遍性特征相类似, 对于映震能力较强的观测井而言, 强震前前驱波现象也具有普遍性的特点。那么, 有前驱波记录的观测井在空间上是否也存在普遍性呢? 为此, 本文定义一定范围、同一次地震前有记录前驱波的观测井数量占观测井总数

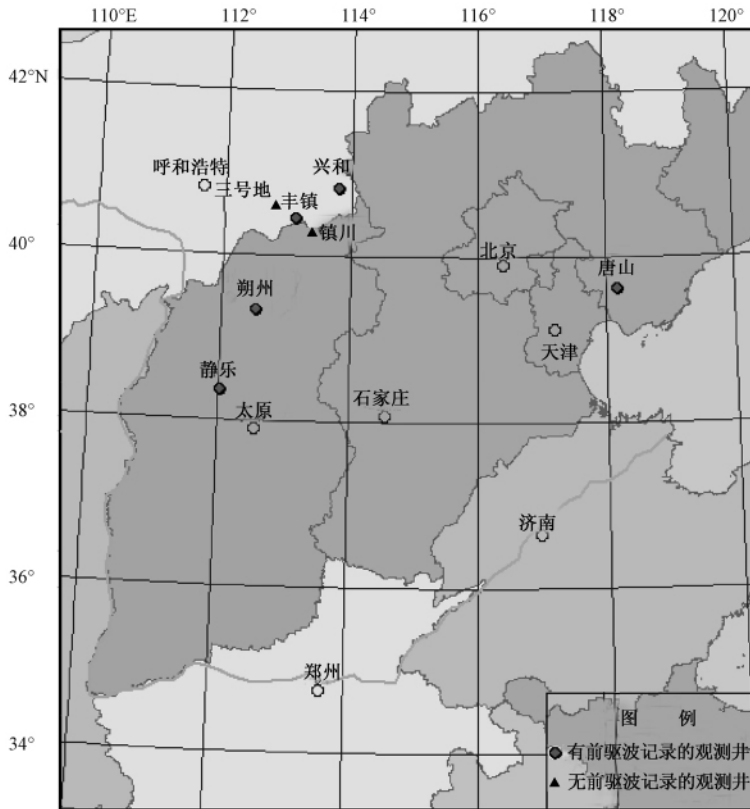


图 10 全球 7 级以上地震前震前有前驱波记录的震中位置图

的百分比大于 50% ,且所记录的前驱波信息不低于震前有前驱波信息总数的 50% 视为空间上的普遍性。本文所选研究区(唐山井除外) 300km 范围内共有 6 口水位观测井(图 10) ,其中 4 口观测井在震前可记录到前驱波信息 ,占观测井总数的 66.7% 。据此可认为井水位前驱波现象在空间上也存在一定的普遍性。

6 结论与讨论

通过对 2003 年全球 20 次 7 级以上地震和中国 43 次 5 级以上地震前山西、内蒙、河北等地映震能力较强的井水位前驱波现象统计、特征分析、机理和普遍性问题的探讨 ,可得到如下一些新的认识。

(1) 在统计范围内多数地震前有前驱波记录 ,其比例可达 65.1% (41/63) ,前驱波与地震的对应率在 76.5% ~92. % 。对于映震能力较强的观测井而言 ,强震前井水位前驱波现象较为普遍。

(2) 虽然井水位前驱波现象对于映震能力较强的观测井存在一定的普遍性 ,但是同一地震前不同观测井前驱波所表现的特征不同 ,同一观测井在不同地震前前驱波所表现的特征也各异。表现在前驱波起始时间与有效观测距离分布范围很广 ,时间从几分钟至十几天 ;有效观测距离从 74 ~19028km 范围均有记录 ;相同地震不同观测井前驱波波动周期各不相

同,同一观测井在不同地震前的波动周期也各异;前驱波波动幅度的范围也很大,由 2 ~ 18mm 均有分布,同一次地震前不同观测井前驱波的波动幅度各不相同,同一观测井在不同地震前的波动幅度也各异;前驱波形态以脉动变粗、正弦波动、阶变型、单脉冲为主要特征,仅有少数观测井前驱波的波动形态存在相似性特点,多数观测井前驱波形态相差较大。这是由于①不同观测井具有不同的井-含水层结构,不同的井-含水层结构对前驱波的响应能力则不同;②不同地震有着不同的波形和震源参数,不同的波形和不同的震源参数则影响前驱波的周期、传播距离以及波动幅度的大小。

(3) 与单井水震波相比,震前有前驱波记录次数略低于水震波记录,其比例在 39.7% ~ 50.7% 之间;震前有前驱波记录的观测井占研究区观测井总数的比例可达 66.7%。井水位前驱波现象无论在记录次数上还是在空间上均具有一定的普遍性。

强震前对于映震能力较强的观测井而言,井水位前驱波现象较为普遍,其比例可达 65.1% (41/63),似具有短临预测意义。但目前水位观测仪的灵敏度相对较低,只能记录到较大地震的前驱波,小震的前驱波太微弱,很难记到。除此之外,多数流体观测井是以地质、石油、水利等部门废弃的井孔改造建成的,在对井孔地点的选择上很难按照流体建网原则,即靠近活动断裂带,特别是靠近活动断裂带的端点、拐点与交点等应力易集中部进行观测井的建设,因此,观测井的内在质量受到一定影响。为了充分的研究井水位地震前驱波问题,还需建设对前驱波频率响应灵敏的观测井,并选择适合的观测仪器。只有在获取更多资料的前提下,地震前驱波的科学问题才可能有所突破。

参考文献

- 车用太、鱼金子、张淑亮等 2002,山西朔州井水位的“前驱波”记录及其讨论,地震学报,24(2),210~216。
冯德益、潘琴龙、郑斯华,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,6(1),41~56。
郭增建、秦保燕,1996,震源成核过程研究综述,国际地震动态,(2),1~4。
李世愚、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。
刘万琴、李世愚、郑治真等,1999,破坏性矿震震前短临阶段震源过程研究,地震学报,21(1),57~64。
吴忠良 2001,地震学中的“暗物质”-“静地震”与地震预测研究的未来,国际地震动态,(9),1~5。
王庆良、张晓东、崔笃信等 2006,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。
张淑亮、李媛媛、李冬梅等 2006,井-含水层系统对前驱波响应能力的分析,地震学报,28(3),259~268。
张淑亮、范雪芳 2003,井水位长周期事件记录及其机理讨论,地震,23(4),85~90。
赵根模、杨港生、陈化然 2001,寂静的前震与地震预测,地震,21(1),69~76。
Bredehoeft J D,1967,Response of well-aquifer systems to earth tides,Journal of Geophysical Research,72(12),3075~3087。
Cooper H H,1965,The response of well-aquifer systems to seismic waves,Geophys Res,70(16),3915~3926。
Dieterich J H,1992,Earthquake nucleation on faults with rate and state dependent strength,Tectonophysics,211,115~134。
Kanamori J,Cipar J J,1974,Focal process of the great Chilean earthquake May 22,1960,Phys Earth Planet Inter,9,128~136。
Kizawa T,1972,The recorders of the gravitational instrument before and after large earthquake,Overseas Earthquake,(1),39~41。
Monastersky R,1994,Before the quake: detecting the slow groan,Science News,146(23),374。
Rice J R,1993,Spatio-temporal complexity of slip on a fault,J Geophys Res,98,9885~9908。

Discussion about the general problems existing in the precursory wave of well water level

Zhang Shuliang^{1 2)} Lv Fang^{1 2)} Li Bin^{1 2)}

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

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

Abstract Taking as the study objects for the five observation wells of underground water level with high earthquake reflecting ability in the provinces of Shanxi , Hebei and Inner Mongolia , the paper studies and discusses the generality of the precursory wave of well water level. It is indicated that the precursory wave happens commonly before strong earthquakes , with a ratio up to 65 percent (41/63) . The characteristics of precursor waves of different observation wells are different. Even for the same observation well , the characteristics of precursory wave for different earthquakes are different too , which may be the result that different observation wells have different well-water-bearing bed structures and different earthquakes have different source parameters. Compared with the single well water shake waves , the recording time of precursory wave before strong earthquakes is slightly less than that of the water shake waves , with a ratio between 39.7 and 50.7 percent. The number of observation wells with precursory wave recordings before earthquakes accounts for up to 66.7 percent of the total of observation wells. Except for its characteristics , the precursory wave of well water level has its generality both in terms of the recording times and space.

Key words: Precursor wave Earthquake Well water level Generality