

李继业、任建辉、张彦吉等,2014,数字化前兆低频前驱波异常特征分析,中国地震,30(3),419~431。

# 数字化前兆低频前驱波异常特征分析

李继业<sup>1)</sup> 任建辉<sup>1)</sup> 张彦吉<sup>2)</sup> 孙鹏宇<sup>4)</sup> 孙强<sup>3)</sup> 武晓军<sup>2)</sup>  
吴海波<sup>4)</sup> 胡滨生<sup>1)</sup> 孟令蕾<sup>1)</sup> 杜天娇<sup>1)</sup>

1) 哈尔滨市防震减灾技术中心,哈尔滨市 世纪大道1号 150021

2) 哈尔滨市通河地震台,哈尔滨 150900

3) 哈尔滨市阿城地震台,哈尔滨 150321

4) 哈尔滨市延寿地震台,哈尔滨 150700

**摘要** 前驱波是一种暂态信号,是在震源成核过程中发射出的一种低频波,对地震预测而言是一种有重要价值的可靠短临前兆信息。本文提取了黑龙江及邻区3次中强地震前5例水位、竖直摆倾斜数字化低频前驱波异常图像,分析了低频前驱波异常形态、异常特征和异常指标,经初步统计得到了经验公式,探讨了前驱波异常机理,取得了一些新的认识,值得一提的是这些震例均为近场区中强地震前数字化前兆低频前驱波异常,丰富了低频前驱波方法在黑龙江地区地震分析预测工作中的应用。

**关键词:** 中强地震 低频前驱波 短临异常 特征研究

[文章编号] 1001-4683(2014)03-0419-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

“前驱波”是由日本地震学家金森博雄于1972年发现并命名的,他在震中距近万千米的美国加州帕萨迪纳地震台长周期地震仪记录中发现1960年智利8.3级地震前15分钟,有震荡周期为300~600s的长周期波,并将其命名为“前驱波”(Kanamori et al,1974)。

低频前驱波的存在已被国内外越来越多的观测资料所证实,且广泛出现在重力、应变、地倾斜、水位及宽频带数字地震等多种观测资料中。Kizawa(1972)在GS12型重力仪光电记录上发现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,有一系列周期为300~600s的特殊脉动叠加在重力潮曲线上,并一直持续到大地震发生。自20世纪60年代以来,许多方法都观测到了很多显著的长周期信息,Monastersky(1994)的研究表明,已有107次浅源大地震前发生过低频振动,即慢地震,并且有20次大地震是先从缓慢振动的起始段开始,然后才转化为通常的高频地震。(Jordan,1991)在地球固有振动的记录中发现一种低频定向慢前兆波,这种前兆波只在中深源大地震前出现,在浅源

[收稿日期] 2013-12-04; [修定日期] 2014-06-24

[项目类别] 中国地震局地震科技星火计划项目(XH12015Y)、黑龙江省自然科学基金项目(200906)联合资助

[作者简介] 李继业,男,1981年生,硕士,高级工程师。主要从事地震活动性及地震预测方法的研究。

E-mail:JIYE\_LI@126.COM

大地震前不出现。李世愚等(2002)介绍了前兆次声波、矿井下低频振动、沙土层超低频形变、井水水位等在强震前超低频事件的观测证据,并通过实验,研究了这种低频振动的产生和传播机理,认为微破裂的集结和断层的起始破裂会出现超低频脉冲。冯志生等(2003)分析了江苏新沂台地电阻率整点值观测资料中的一种新变化——远大震前驱波。陈德福(2006)分析了全国潮汐形变观测记录的14个震例中36个前驱波图像的特点、形态、量级,总结了潮汐形变前驱波的时空特征,并指出形变前驱波具有前兆性、重现性、可靠性的特点。张淑亮等(2009)对2008年5月12日四川汶川8.0地震前山西地区前兆测项变化进行了分析,认为地震前兆主要以低频前驱波为特征,其波动的优势周期为64~128min;异常点的展布方向与汶川地震主破裂方向一致;低频前驱波出现的时间具有丛集性特点,主要集中在汶川8级大震前一天的14:00~16:00。

这些长周期信息有望对地震临震预测研究起到积极的推动作用。目前,国内外对中强远震前驱波的报道和研究较多,普遍认为是形变的远场效应,由于远场范围较大,对发震地点的判别非常困难,直接影响了该方法的实效性和预测意义。本文通过对黑龙江及周边中强地震前数字化低频前驱波进行提取与分析,初步总结了近场区中强地震前驱波异常特征,旨在为进一步研究近场区短临阶段的地震前驱波现象积累经验。

## 1 前驱波异常形态分析

观测资料是地震科学赖以生存和发展的基础,也是开展防震减灾工作的主要依据,对前兆观测数据干扰的排查及内在质量的评价是前驱波异常提取与分析的基础,如果这个基础不牢则对异常现象的分析、异常指标的提取、异常机理的研究和前驱波异常经验公式的统计等就会失真。因此,对黑龙江及邻区数字化观测资料噪声干扰的排除和分析是进行地震预测研究的重要的基础。多年的地下水微动态和地倾斜研究结果表明,井水位和竖直摆钻孔倾斜对地壳应力-应变的响应频域较宽,可记录到地震波中的瑞雷波(10~20s)、潮汐波动(8~12h)、气压波动(几小时至几天)、风扰波动(数十分钟)。除此之外,井水位和地倾斜观测还受降雨效应(补给、荷载)、地下水开采和观测仪器本身原因等干扰因素的影响(张淑亮等,2005;薄万举,2010)。因此,在研究水位、竖直摆倾斜前驱波异常与地震的对应关系时必须排除非震源信息的干扰,尤其是气压、台风等扰动信号。本文在大量的现场核实、形态对比分析、干扰分类提取、波动滤波分离、信号频谱分析和查找噪声干扰源等繁琐工作的基础上(具体提取过程工作量较大,图件较多,由于篇幅关系,另文详述,在此不再赘述),排除了干扰噪声,提取了黑龙江及邻近地区3次中强地震前的5例水位、竖直摆倾斜低频前驱波异常。

### 1.1 2008年内蒙古阿荣旗5.2级地震前延寿竖直摆倾斜前驱波

2008年6月10日内蒙古阿荣旗5.2级地震前10天,距离震中550km的延寿台竖直摆倾斜出现固体潮汐畸变及扰动现象,NS向异常扰动主要集中在6月1日14时~3日8时,持续时间42h、最大幅值为0.0327"、最大周期32min,异常消失后174h发生内蒙古阿荣旗5.2级地震(图1(a)、(b));EW向异常扰动主要集中在6月1日14时~3日11时,持续时间45h、最大幅值为0.0817"、最大周期48min,异常消失后171h发生内蒙古阿荣旗5.2级地震(图1(c)、(d))。

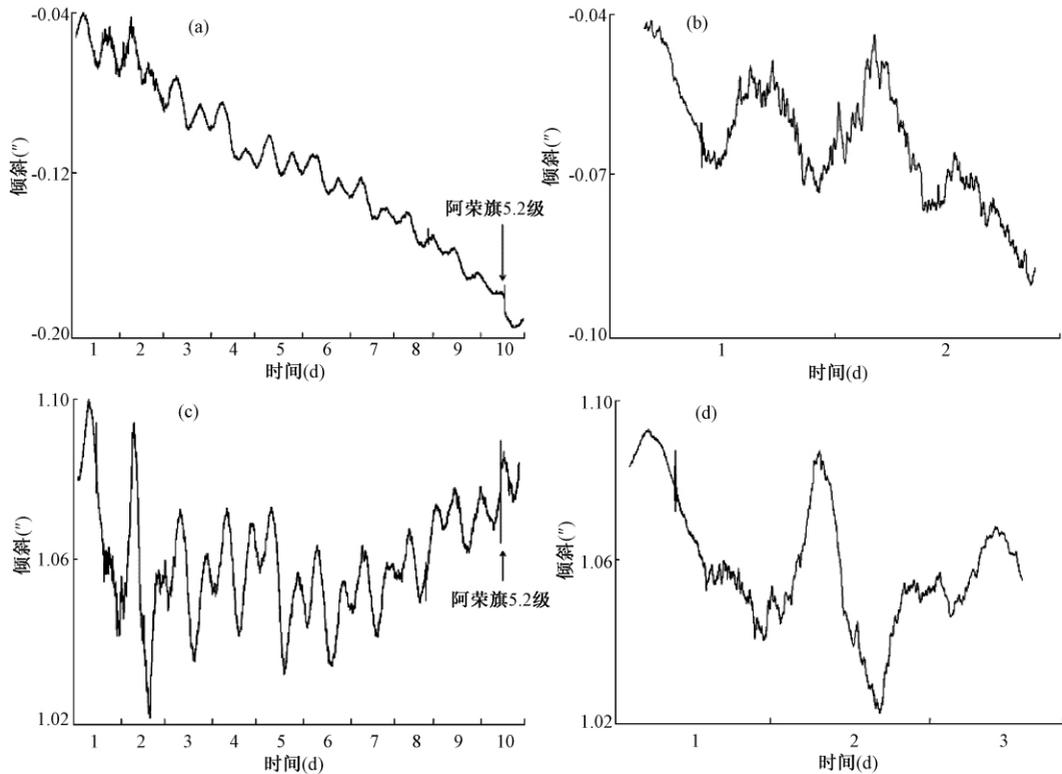


图1 阿荣旗地震前竖直摆倾斜记录到的前驱波

(a) EW 向分钟值原始观测曲线;(b) EW 向前驱波放大曲线;(c) NS 向分钟值原始观测曲线;(d) NS 向前驱波放大曲线

## 1.2 2009 年吉林抚松 4.6 级地震前延寿台竖直摆倾斜前驱波

2009 年 8 月 5 日吉林抚松 4.6 级地震前 17 天,距离震中 350km 的延寿台竖直摆倾斜出现固体潮汐畸变及扰动现象,NS 向异常扰动主要集中在 7 月 19 日 12 时~21 日 23 时,持续时间 59h、最大幅值为 0.0383″、最大周期 46min,异常消失后 357h 发生吉林抚松 4.6 级地震(图 2(a)、(b));EW 向异常扰动主要集中在 7 月 20 日 10 时~21 日 18 时,持续时间 18h、最大幅值为 0.0135″、最大周期 53min,异常消失后 362h 发生吉林抚松 4.6 级地震(图 2(c)、(d))。

## 1.3 2008 年内蒙古阿荣旗 5.2 级地震前延寿水位前驱波

2008 年 6 月 10 日内蒙古阿荣旗 5.2 级地震前 6 天,距离震中 550km 的延寿台水位同样出现固体潮汐畸变及扰动现象,异常扰动主要集中在 6 月 4 日 9 时~14 时、20 时~5 日 9 时、6 日 4~17 时、22 时~7 日 3 时、7 日 9~14 时和 18 时~8 日 11 时,共出现 6 组,持续时间 38h、最大幅值为 32mm、最大周期 15min,异常消失后 52h 发生内蒙古阿荣旗 5.2 级地震(图 3(a)、(b))。

## 1.4 2009 年吉林抚松 4.6 级地震前通河水位前驱波

2009 年 8 月 5 日吉林抚松 4.6 级地震前 15 小时,距震中 438km 的通河台水位出现固体潮汐畸变及扰动现象,异常扰动主要集中在 8 月 5 日 5~7 时、8~9 时、11~12 时、13~14

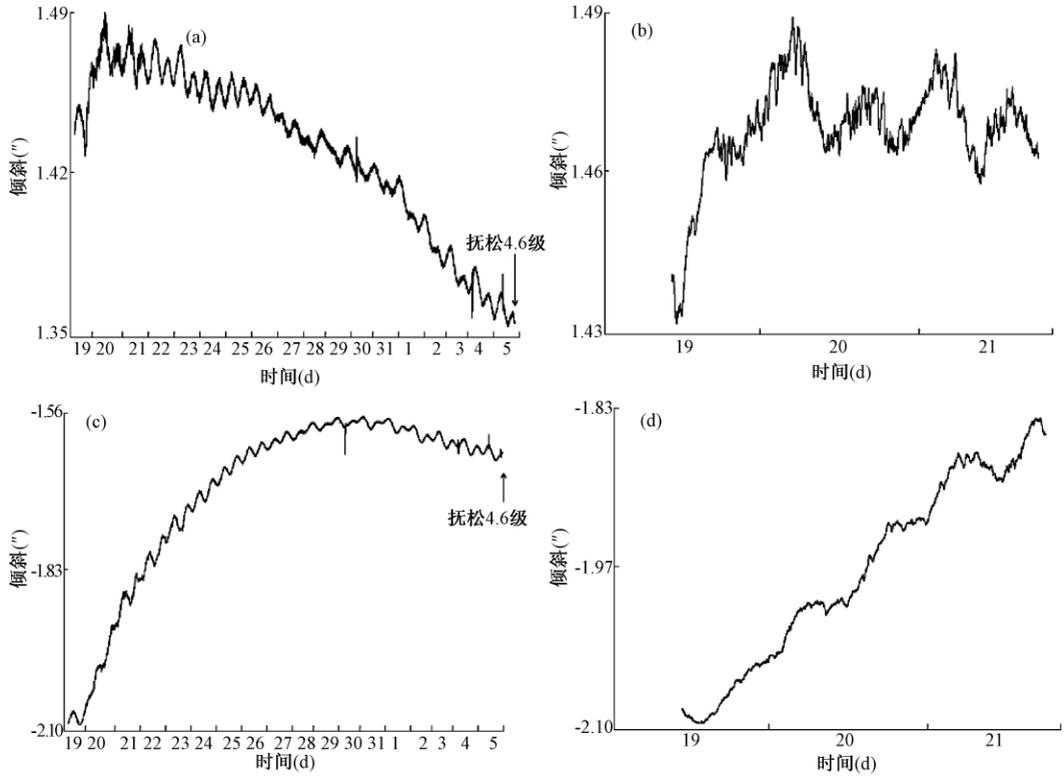


图2 抚松地震前竖直摆倾斜记录到的前驱波

(a) EW 向分钟值原始观测曲线; (b) EW 向前驱波放大曲线; (c) NS 向分钟值原始观测曲线; (d) NS 向前驱波放大曲线

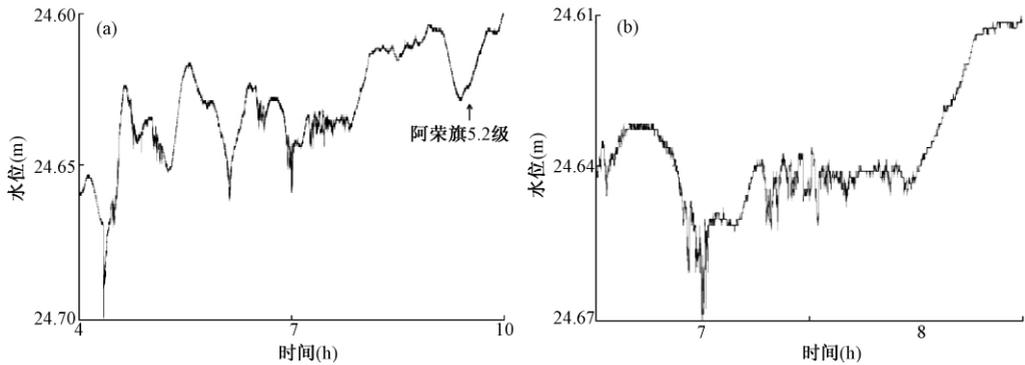


图3 阿荣旗地震前水位记录到的前驱波

(a) 分钟值原始观测曲线; (b) 前驱波放大曲线

时,共出现4组,持续时间5h、最大幅值为6mm、最大周期11min,异常消失后6h发生吉林抚松4.6级地震(图4(a)、(b))。

### 1.5 2008年黑龙江龙江4.6级地震前通河台水位前驱波

2008年7月7日黑龙江龙江4.6级地震前4天,距震中447km的通河台水位出现固体

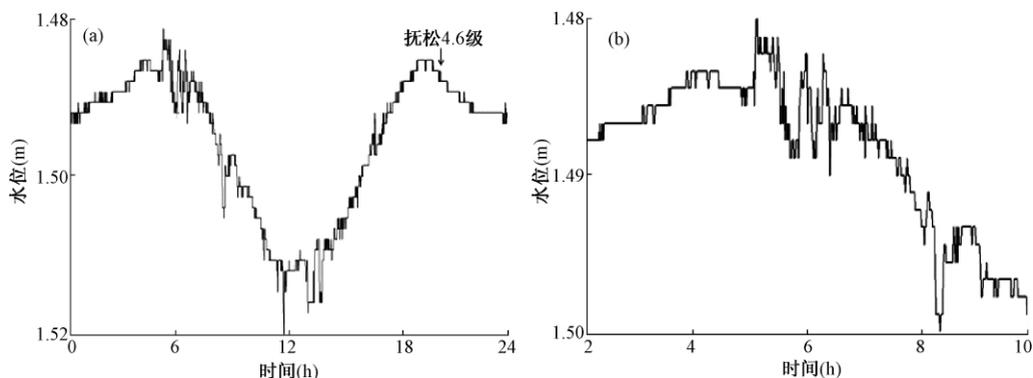


图4 抚松地震前水位记录到的前驱波

(a) 分钟值原始观测曲线; (b) 前驱波放大曲线

潮汐畸变及扰动现象,异常扰动主要集中在7月3日20~23时和4日1~2时,共出现2组,持续时间5h、最大幅值为11mm、最大周期6min,异常消失后84h发生黑龙江龙江4.6级地震(图5(a)、(b))。

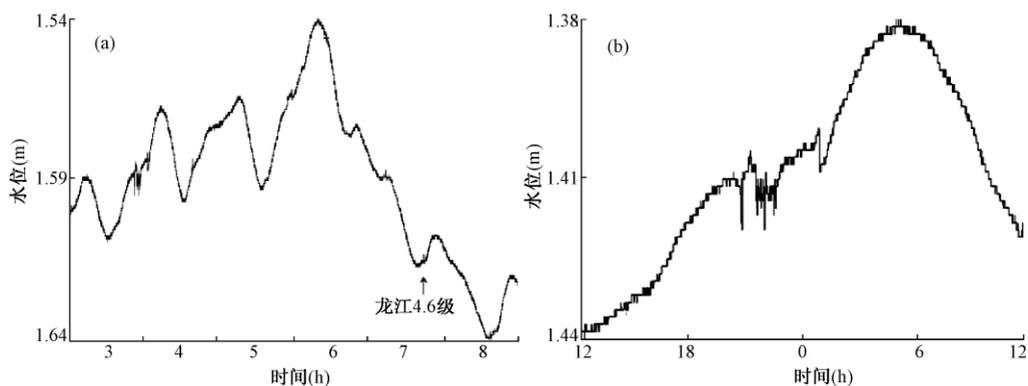


图5 龙江地震前水位记录到的前驱波

(a) 分钟值原始观测曲线; (b) 前驱波放大曲线

## 2 前驱波异常特征分析

### 2.1 发震时间分析

统计表明,与慢地震有关的前驱波比前震更普遍,出现的时间主要集中在主震前7天内,从一部分中等地震到特大地震之前都已观测到前驱波,这就说明大的脆性破裂之前,较小的缓慢破裂在自然界是存在的而且比较普遍。低频前驱波主要表现为先出现、后消失、再地震。低频前驱波一般出现在震前数小时至1周左右时间,具有典型的短临时间预测指标意义。陈德福(2006)通过对29个省市区120多个台站归纳出14个震例的36个潮汐形变波图像,并将其统称为潮汐形变前驱波图像。对震级与潮汐形变前驱波震中距统计发现,前驱波震中距与震级似乎有较好的相关性,近似呈对数分布特征;异常出现时间从几十分钟至6.5天。其中,0.1~6.5天的占94%,1~6.5天的占19%,大于6.5天的仅占5%,即6.5天

内发生地震的可能性最大。

通过对黑龙江及邻区中强地震前数字化低频前驱波异常分析发现:①2008年6月10日内蒙古阿荣旗5.2级地震前,延寿台水位前驱波异常消失距离发震间隔仅为2天,延寿台倾斜前驱波异常消失距离发震时间间隔仅为7天。②2008年7月7日黑龙江龙江4.6级地震前,通河台水位前驱波异常消失距离发震间隔仅为4天。③2009年8月5日吉林抚松4.6级地震前,通河水台位前驱波异常消失距离发震间隔只有2个小时,延寿台倾斜前驱波异常消失距离发震间隔长达14天。本文分析发现,黑龙江及邻区数字化前兆低频前驱波异常等待时间较以往研究得到了扩展,短期有2个小时,中期有2~7天,最长不超过半个月,但优势等待时间在1周以内,占80%。

## 2.2 经验公式分析

井水位前驱波现象不是气压、风、降雨等干扰因素的短期突变造成的,可能反映了大震前震源过程信息(张淑亮等,2005)。高金哲等(2005)通过对井水位在中强地震前长周期的异常波动现象的研究发现,前驱波异常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,很多强震前几小时至十几小时一般就可以记录到井水位长周期异常波动变化,且主要集中在7天以内,占93%。牛安福(2003)通过总结1990年以来我国地震活跃地区地倾斜观测台站在一些地震前观测到显著的突变性倾斜现象,用最小二乘法拟合,给出了我国大陆地震前观测到的地倾斜前兆持续时间与地震震级之间的统计关系式,发现异常持续时间越长,震级越大。其中,震级拟合平均误差为0.35级。同时,采取震级与变形幅度间的一般性关系模型(罗灼礼,1980)进行拟合,最后得到倾斜异常幅度与地震震级及震中距的关系模型。其中,震级拟合的平均平方误差为0.37级。本文在借鉴前人的工作基础上,总结了前驱波异常信息(表1),兼顾了不同学科记录到的低频前驱波特征,分学科建立了前驱波异常特征与地震三要素的统计经验公式。

表1 前驱波异常信息

异常台站	测项	异常起止日期 (年.月.日)	异常出现时间 (h)	异常持续时间 (h)	异常等待时间 (h)	最大振幅	最大周期 (min)	发震时间 (年.月.日)	震中位置	震级	震中距 (km)
延寿	水位	2008.6.4~8	149	38	52	32mm	15	2008.6.10	阿荣旗	5.2	550
通河	水位	2009.8.5	15	5	6	6mm	11	2009.8.5	抚松	4.6	438
通河	水位	2008.7.3~4	90	5	84	6mm	6	2008.7.7	龙江	4.6	447
延寿	NS	2008.6.1~3	216	42	174	0.0327"	32	2008.6.10	阿荣旗	5.2	550
	EW	2008.6.1~3	216	45	171	0.0817"	48				
延寿	NS	2009.7.19	416	59	357	0.0383"	46	2009.8.5	抚松	4.6	350
	EW	2009.7.20~21	394	18	362	0.0135"	53				

注:异常出现时间是指第一组前驱波出现的时间距离发震时刻的时间;异常等待时间是指最后一组前驱波结束后后距离发震时刻的时间;EW、NS为竖直摆倾斜测项的方向。

阿荣旗、龙江和抚松地震前水位前驱波最大异常幅度仅为32mm,周期均在15min以内,前驱波持续累积时长较短,阿荣旗地震前水位前驱波累积时长最长,也只有38h。异常结束后3天左右发生地震,震中距在600km范围内。同时还发现水位前驱波异常具有如下特征:①振幅与震级、震中距关系不大;②异常持续时间与震级、震中距存在一定的正比关

系;③震中距与震级存在一定的正比关系;④异常开始到发震时间与异常持续时间存在正比关系,与震中距、震级关系不大;⑤震级与异常持续时间和震中距存在一定的正比关系,即异常持续时间越长、震中距越远,震级  $M$  相对越大;而异常持续时间越长,异常出现至发震时间也可能越长。根据以上特征,参照以往经验,建立经验公式

$$M = 2.05 + 0.11\lg T + \lg R (M \pm 0.3) \quad (1)$$

$$2\lg R = 1.05M + \lg \varepsilon_{\max} + 0.4 \quad (2)$$

$$\lg t = (\lg T + 0.05M + 0.67) \pm 0.45 \quad (3)$$

式中  $T$  为异常持续时间 (h),  $t$  为异常开始到发震时间,  $\varepsilon_{\max}$  为异常最大幅度,  $R$  为震中距。

阿荣旗和抚松地震前竖直摆倾斜前驱波异常最大波动幅值为  $0.01'' \sim 0.09''$  持续时间约 50h, 异常结束后 7 天发生阿荣旗地震, 而抚松地震发生在异常结束后 15 天。两次地震的震中距分别为 550km 和 350km。同时还发现水位前驱波异常具有如下特征:①振幅与震级、震中距存在一定的正比关系;②异常持续时间与震级存在一定的反比关系;③震中距与震级存在一定的正比关系;④异常开始到发震时间与异常持续时间存在正比关系, 与震级、振幅、震中距存在反比关系;⑤震级与异常幅度和震中距存在一定的正比关系, 即异常幅度越大、震中距越远, 震级相对越大;而异常持续时间越长, 异常出现至发震时间也可能越长。根据以上特征, 参照以往经验, 建立经验公式

$$1.02M = 2\lg R + 0.5\varepsilon_{\max} - 0.2\lg T (M \pm 0.3) \quad (4)$$

$$\lg R = 0.38M + 0.11\lg \varepsilon_{\max} + 0.91 \quad (5)$$

$$\lg (t \pm 72) = 0.05T - 0.02M \quad (6)$$

式中  $T$  为异常持续时间 (h),  $t$  为异常结束后等待时间,  $\varepsilon_{\max}$  为异常最大幅度,  $R$  为震中距。

对黑龙江及邻区中强地震前数字化低频前驱波异常统计经验公式进行了检验, 检验效果分为很好、好、差和一般 4 个等级。很好是指震级误差  $\Delta M \leq 0.2$ 、震中距误差  $\Delta R \leq 20\text{km}$ ; 实际发震时间在预测时间范围内。好是指  $\Delta M \leq 0.3$ 、 $\Delta R \leq 30\text{km}$ ; 实际发震时间与预测时间范围相差 2 天内。差是指  $\Delta M > 0.5$ 、 $\Delta R > 50\text{km}$ ; 实际发震时间与预测时间范围相差 3 天以上。对于不满足以上 3 个条件的检验效果, 定义为一般。

表 2 经验公式检验效果表

实发地震	异常测项	震级	预测震级	预测效果	震中距 (km)	预测震中距 (km)	预测效果	异常出现时间 (天)	预测出现时间 (天)	预测效果
内蒙古阿荣旗	水位	5.2	5.0	很好	550	575	好	6.2	4.7 ~ 37.1	很好
黑龙江龙江	水位	4.6	4.8	很好	447	457	很好	3.8	0.6 ~ 4.8	很好
吉林抚松	水位	4.6	4.8	很好	438	457	很好	0.6	0.6 ~ 4.8	很好
内蒙古阿荣旗	竖直摆倾斜	5.2	5.1	很好	550	550	很好	6.2	2.2 ~ 8.2	很好
吉林抚松	竖直摆倾斜	4.6	4.6	很好	350	331	很好	15.2	13.9 ~ 19.9	很好

在前驱波异常经验公式检验中, 震级、震中距和发震时间检验效果均较为理想 (表 2), 预测震级与实际震级偏差都在 0.2 级之间, 尤其是竖直摆倾斜经验公式预测阿荣旗地震震

级与实际震级几乎一致;预测震中距与实际震中距偏差很小,除水位经验公式预测阿荣旗地震震中距为 25km 外,其它地震的震中距偏差均在 20km 范围内,尤其是竖直摆倾斜经验公式对阿荣旗地震预测震中距与实际震中距一致;实际发震时间也都在预测时间范围内,且主要集中在所预测时间段的下限阶段。

### 2.3 异常时段特征

以往的低频前驱波观测资料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它台站或者其它观测手段进行佐证(张淑亮等,2011)。本文通过提取分析黑龙江及邻区数字化低频前驱波异常,发现 3 次中强地震前低频前驱波异常优势等待时间为 7 天,优势震中距离为 300 ~ 600km,优势手段为形变学科的竖直摆倾斜观测和流体学科的水位观测。前驱波异常与地震的关系都表现出“竖直摆倾斜异常出现-消失-水位异常出现-消失-发震-震后无异常”的特点,即先竖直摆倾斜出现前驱波异常,消失后水位出现前驱波异常,在水位前驱波异常消失后才发生地震。但 3 次地震前前驱波异常特性均不同,阿荣旗地震前,表现为同一个观测台站,不同测项异常;抚松地震前,表现为不同观测台站,不同测项异常;龙江地震前则表现为单台单一测项异常,而且不同学科的异常形态也有明显差异,形变表现为单组固体潮汐畸变异常,流体表现为多组间歇性脉冲异常。

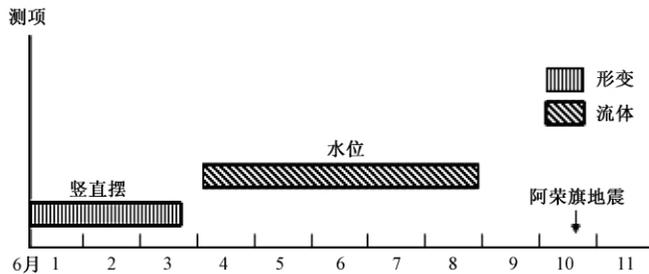


图 6 6 月 1 日~6 月 11 日阿荣旗地震前竖直摆倾斜和水位前驱波异常时段

2008 年 6 月 10 日内蒙古阿荣旗 5.2 级地震前,6 月 1 日延寿台竖直摆倾斜出现间歇性低频前驱波异常,6 月 3 日消失。6 月 4 日延寿水台位同样出现间歇性低频前驱波异常,6 月 8 日消失。异常结束后 2 天,6 月 10 日发生地震。根据前驱波异常出现的规律,形变先于流体,且均在地震发生前消失。

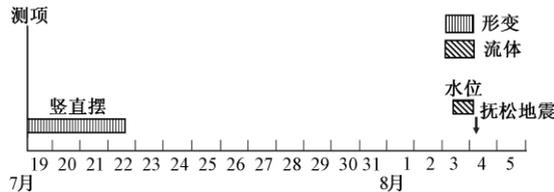


图 7 7 月 19 日~8 月 6 日抚松地震前竖直摆倾斜和水位前驱波时段异常

2008 年 8 月 5 日吉林抚松 4.6 级地震前,7 月 19 日延寿台竖直摆出现间歇性低频前驱波异常,22 日消失。8 月 5 日地震发生前 4 小时,通河台水位出现间歇性低频前驱波异常,异常消失后 3 小时发生地震。这一特征符合前驱波“竖直摆倾斜异常出现-消失-水位异常

出现“消失-发震-震后无异常”的规律,而且形变先于流体,且均在地震发生前消失。

#### 2.4 异常差异特征

分析发现,水位和竖直摆倾斜前驱波异常均在地震前半个月出现,为临震异常;异常形态多为扰动、固体潮畸变,异常幅度相对较小;前驱波异常的优势接收方位都为台站西向;接收前驱波地震震级下限均为 4.6。前驱波异常在黑龙江地区存在这些共性特征的同时,也存在着明显的差异性。在异常形态上,竖直摆倾斜前驱波以固体潮畸变形态为主,水位前驱波多为扰动形态;竖直摆倾斜前驱波异常台站距离震中一般为 350 ~ 550km,水位前驱波异常台站距离震中略远,但也集中在 450 ~ 550km 的近场区范围内。在异常持续时间上,竖直摆倾斜前驱波异常持续时间相对较长,为 2 ~ 3 天,水位前驱波异常持续时间次之,一般为几小时至 2 天以内。在异常等待时间上,竖直摆倾斜前驱波一般在异常结束后半个月发震,水位前驱波在异常结束后 1 周内发震。在异常出现时间上,钻孔倾斜观测记录的前驱波早于井水位观测记录的前驱波,二者在出现时间上明显不同步,这主要是因为地壳形变与地下水水位前驱波异常都是在地震孕育过程中断层破裂前的预滑移或预扩展中产生的低频波,是震前由于应力-应变变化而导致的能量释放,钻孔倾斜以更直观的物理量,先于水位捕捉到这种应力-应变的变化。牛安福(2003)研究地震短临前兆异常时间特征发现,变形前兆往往发生在地下流体之前。车用太等(2006)通过一系列理论、实验与观测分析,明确提出:地下水微动态形成可分为两种过程:岩土力学过程与水动力学过程,岩土力学过程指含水层岩土受力作用发生地壳变形破坏,并由此引起孔隙压力变化的过程。可见,地壳形变与地下水的前兆异常之间具有某种直接的成因联系,形变倾斜变化是岩石受到应力作用后的变形反映,流体水位变化是在岩石受应力后含水层孔隙压力发生改变而产生的次生现象,这也表明形变学科对地震应力-应变的反映最为直接,而流体学科次之。

### 3 前驱波异常指标分析

根据赵根模等(2001)的统计,前驱波有效观测距离为 40 ~ 8000km,小于 2000km 的占 81%;拥有前驱波的主震震级范围很宽,一般 5 级以上地震都有前驱波记录,但以大地震为主;从主震 P 波到达前至震前数十天都有地震前驱波出现的记录,有一列波动的,也有多列间断波动的,7 天内发震可能性占 93%;地震前驱波可持续(或间断)几十个小时,甚至数十天,说明其震源的活动过程是快于蠕滑、慢于地震的持续(或间断)中速构造运动,是以应力调整单元为主释放源的慢地震过程,其波源在未来主震震源附近。黑龙江及邻区中强地震前一个月内可能出现前驱波异常(并在震前消失),形态多为扰动和固体潮畸变,并可能伴有不同测项的异常出现。通过本文分析,前驱波异常指标可以概括为以下几个方面。

(1) 时间指标。在数字化低频前驱波异常持续时间上,形变异常为 2 ~ 3 天,流体异常次之,一般为几小时至 2 天内;一般在形变异常结束后一个月内有发震可能,在流体异常结束一周内有发震可能;如果形变和流体都出现异常,则流体异常结束后 3 天内存在发生地震的可能,最短为 3 小时。如果单手段(仅竖直摆倾斜)出现异常,则在异常期间可能发震,最短时间为异常出现几小时内。

(2) 空间指标。从形变和流体学科接收到前驱波的台站位置和实际地震空间分布看,对前驱波接收较为敏感的区域为黑龙江西部,尤其是台站西北部 350 ~ 550km。这一点可能

跟黑龙江地区西部地震活动性较东部地区活跃,可总结的震例相对较多有关,在此仅供参考。

(3) 强度指标。水位前驱波异常持续时间与震级存在一定的正比关系,异常持续时间越长,震级越大;竖直摆倾斜前驱波异常最大幅度似乎与主震震级存在一定的正比关系,异常幅度越大,震级越大。虽然个别震例不显著,但整体来看,统计规律较为明显。记录到流体前驱波异常的震级下限为 4.6,其中异常持续时间大于 30 小时,相应震级可能在 5.0 以上,而异常持续时间小于 30h,相应震级可能为 4.6~5.0;记录到形变前驱波异常的震级下限亦为 4.6,其中竖直摆倾斜最大异常幅度大于 0.05",相应震级可能在 5.0 以上,而最大异常幅度小于 0.05",相应震级可能为 4.6~5.0。

## 4 前驱波异常机理分析

很多专家、学者对前驱波的前兆意义给予充分肯定(陈运泰等,1979;冯德益等,1984;Dieterich,1992;Rice,1993;李世愚等,2000;吴忠良,2001;车用太等,2002)。大量理论与实验研究表明,在地震破裂成核过程中或孕震系统进入非线性的临界状态阶段,会涌现出许多较容易观测到的暂态信号。前驱波可能就是这种信号,是震源在成核过程中发射出来的一种低频波,是在大的快速破裂发生前,孕震断层层面断层盘有一缓慢的运动,发射出长周期波;震前地壳内的长周期波可能由断层预滑或断裂预扩展产生的,其周期一般为几十秒至几小时,粘滑前的预滑与破裂前断裂的预扩展可能是产生长周期波的原因;震前短临阶段的亚临界扩展不仅激发长周期波(前驱波),而且也常诱发小震事件。

低频前驱波与传统的静力学前兆模式不同,简单理解就是地震前一段时间内出现的前兆波动信号,属于波动力学的范畴。深入理解就是一种暂态信号,是在震源成核过程中发射出的一种低频波。初步认定前驱波来源于断层脆韧转换带慢地震过程或断层脆性层的预位移启动过程,是半脆性层慢破裂激发的低频前兆慢地震波,一旦启动,很容易直接发展成构造地震。研究表明,随着破裂的集结,破裂尺度越来越大,辐射出的波的周期也越来越长。低频前驱波一般都是在震前几天接收到,是目前已发现的可重复性最强、可靠性最大的短临前兆异常信息。

通过本文分析和借鉴前人总结,要想记录到有价值的数字化前兆低频前驱波应该具备 3 个基本条件。

(1) 要有宽频带、高灵敏度、高精度、高采样率和分辨率的传感器系统。粘滑前的预滑与破裂前断裂的预扩展可能会产生长周期波,即前驱波,故前驱波是一种弹性波,可以被低频接收器记录到。没有有效的观测仪器,就无法记录到包含地球物理信息的有效数据。大地震前低频前驱波信号很容易被系统噪声和环境干扰所淹没,近场区中强地震前低频前驱波就更加微弱,给分析和研究工作带来极大难度,这就要求前驱波记录仪器具有一定的带宽及较高的灵敏度,并具有较高的采样率和分辨率,满足这些参数的前兆观测设备是低频波记录的基础观测条件。

(2) 要具备宽频带、承压性、封闭性较好的观测井孔系统。由于地下水的普遍性、流动性与难压缩性,它形成一个封闭的承压系统时,井水位变化就能客观、灵敏地反映地壳的应变状态(汪成民等,1981)。对于封闭良好的承压含水层来说,井-含水层系统相当于高灵敏

度的体应变仪(Bodvarsson, 1970; 张昭栋等, 1988、2000)。同时, 水位连通性好能给低频前驱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)。延寿台和通河台竖直摆倾斜、水位观测仪器就具备这样的条件。安装在井下的倾斜仪、水位仪与特殊构造部位的观测井孔共同组成一个天然的地震计, 它能够记录到固体潮汐及地震发生前的异常信息和地震发生时的同震响应, 这个天然的地震计也就具有自身的观测带宽和响应频率。根据波在固体介质中传播的一般规律, 波的传播特征与波的频率有关, 强震前产生的低频波更容易传播到远距离, 对于中等地震前产生的低频波自然也可以在近场区出现, 因此这种由断层预滑或断裂预扩展产生的应变波便会被部分在方向和频段上与其响应的钻孔倾斜仪捕捉到, 于是延寿台钻孔倾斜就观测到了中强地震前低频前驱波异常。由于这个天然的地震计是由倾斜仪、水位仪和观测井孔共同组成, 把同样的倾斜仪、水位仪, 安装在不同深度的井孔和构造位置, 观测不同层位的含水层。因此, 即便是天然地震计其响应频率也不尽相同, 自然对低频前驱波的响应特征亦存在明显差异。

(3) 要记录到强震前长周期波, 就必须找到合适的条件使记录位置处于低频传播的最佳通道(唐林波等, 2002)构造的特殊部位上, 即前兆敏感点。黑龙江及邻区中强地震发生的主动源来自西太平洋板块向西的俯冲, 并且该地区位于西太平洋板块俯冲带前缘的上方。依舒断裂带是郯-庐断裂向北延伸的部分, 是黑龙江省东部地区地震活动的控震构造带, 由于长期受太平洋板块俯冲力和侵入岩活动的作用, 其下部边缘(兴凯湖-布列亚山地块)已侵入太平洋板块, 成为环太平洋板块陆缘构造域的一部分。该断裂上的地震活动最能反映西太平洋板块对东北块体的作用。冯德益等(1984)认为, 由断裂预扩展产生的长周期形变波在距断裂端部一定距离处才明显形成。因此, 在黑龙江及邻区具备基本的构造环境和天然条件来开展低频前驱波的研究。

## 5 讨论与结论

(1) 本文在大量的噪声和干扰排查工作的基础上, 提取和分析了黑龙江地区 3 次中强地震前 5 例水位、竖直摆倾斜数字化低频前驱波异常图像, 总结了低频前驱波异常的形态、特征和指标, 初步统计了经验公式, 探讨了前驱波异常机理, 尤其是近场区中强地震前数字化低频前驱波特征。

(2) 本文探讨了近场区形变、流体低频前驱波异常特征。通过分析发现, 低频前驱波异常主要特征为出现-消失-发震, 出现时间为震前数小时至半个月, 等待优势时间为 7 天, 为临震异常; 异常形态多为扰动、固体潮畸变, 异常幅度相对较小; 优势震中距离为 300 ~ 600km, 前驱波优势接收方位为台站西部; 接收前驱波的地震震级下限均为 4.6; 优势观测手段为竖直摆倾斜和水位观测。这些特征为探索低频前驱波在黑龙江地区中强地震短临预测指标提供了帮助。

(3) 低频前驱波震级下限和异常等待时间得到了扩展。目前, 本文已从 4.6 级中强地震的观测记录中提取出了不同测项的低频前驱波异常, 扩展了低频前驱波映震震级的下限。我国地震工作者所揭示的低频前驱波主要出现震前数小时至 7 天左右时间, 美国、俄罗斯、日本等国学者所发现的低频前驱波信号主要出现在震前数分钟至一个半小时左右的时间段内。本文发现, 前驱波异常等待时间短者 2 小时, 中期有 2 ~ 7 天, 长期不超过半个月。在此

基础上,分析了前驱波异常的出现时间、持续时间、等待时间以及最大幅度和地震震级、震中距之间的关系,统计了经验公式,并进行了检验,取得比较满意的效果。

综上所述,黑龙江及邻区中强地震前半个月内存在低频前驱波异常,并在震后消失。由此我们受到启发,即前驱波作为一种前兆方法的观测研究,可能为黑龙江及邻区这样以孤立型为主的中强地震的预报探索一条新途径。

## 参考文献

- 薄万举,2010,形变异常与干扰关系的再认识,大地测量与地球动力学,30(1),5~8。
- 陈运泰、黄立人、林邦慧等,1979,用大地测量资料反演的1976年唐山地震的位错模式,地球物理学报,22(3),201~217。
- 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。
- 车用太、鱼金子,2006,地震地下流体学,北京,气象出版社。
- 陈德福,2006,潮汐形变前驱波的时空特征,大地测量与地球动力学,26(2),24~30。
- 冯志生、杨从杰、梅卫萍等,2003,新沂台地电阻率整点值观测的远大震前驱波变化,地震地磁观测与研究,24(4),9~13。
- 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,6(1),41~56。
- 高金哲、吕政、张洪艳等,2005,地震前驱波观测与研究进展,华南地震,25(1),53~58。
- 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。
- 李世愚、刘建新、和雪松等,2002,地震前低频事件的实验研究,地震地磁观测与研究,23(4),1~7。
- 罗灼礼,1980,震源应力场、形变场和倾斜场,地震学报,2(2),169~184。
- 牛安福,2003,地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究,地震学报,25(4),441~445。
- 唐林波、李世愚、苏昉等,2002,地震前长周期事件的研究——历史与现状,中国地震局地球物理研究所论著,02AC2008.1~6。
- 汪成民、罗光伟、石锡钟,1981,地震前后地下水位异常动态与裂隙演变,地震科学研究,(4),1~7。
- 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。
- 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。
- 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、刘瑞春、宁亚灵等,2009,汶川 $M_s8.0$ 地震前山西前兆低频前驱波特征分析,大地测量与地球动力学,29(6),35~39。
- 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。
- 张昭栋、郑金涵、冯初刚,1988,一种估算地震引起应力场调整的新方法,地震,8(3),19~27。
- 张昭栋、迟镇乐、陈会民等,2000,井水位的振荡与地震波,地震研究,23(4),418~425。
- Bodvarsson G,1970,Confined fluids as strain meters,Geophys Res,75,2711~2718。
- 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。
- Dieterich J H,1992,Earthquake nucleation on faults with rate and state dependent strength,Tectonophysics,211,115~134。
- Jordan T H,1991,Far field detection of slow precursors to fast seismic ruptures,Geophys res Lett,1991~2022。
- 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 earthquake: 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。

## Analysis of abnormal characteristics on digital low-frequency precursory waves

*Li Jiye*<sup>1)</sup> *Ren Jianhui*<sup>1)</sup> *Zhang Yanji*<sup>2)</sup> *Sun Pengyu*<sup>4)</sup> *Sun Qiang*<sup>3)</sup> *Wu Xiaojun*<sup>2)</sup>  
*Wu Haibo*<sup>4)</sup> *Hu Binsheng*<sup>1)</sup> *Meng Linglei*<sup>1)</sup> *Du Tianjiao*<sup>1)</sup>

1) Harbin Technical Center of Earthquake Prevention and Disaster Reduction, Harbin 150021, China

2) Tonghe Seismic Station, Harbin 150900, China

3) Acheng Seismic Station, Harbin 1500321, China

4) Yanshou Seismic Station, Harbin 150700, China

**Abstract** The precursory wave is a kind of transient signals and low-frequency waves in the process of source nucleation. It is also an important prediction value and reliable short-impending precursory information. This paper extracted 5 cases of digital low-frequency precursory wave abnormal images before 3 moderately strong earthquakes in the Heilongjiang and its adjacent area, and analyzed abnormal morphology, abnormal characteristics and abnormal index of low-frequency precursory waves. We got a new understanding on the basis of preliminary statistic analysis and precursory wave abnormal mechanization research. These earthquake cases have greatly enriched the digital low-frequency precursory wave before moderately strong earthquakes in near field region, and contribute to the application of low-frequency precursory wave on analysis and prediction work in the Heilongjiang region.

**Key words:** The moderately strong earthquakes Low-frequency precursory waves Short-impending anomaly Study on characteristics