

李继业, 孟令升, 马龙辰, 等. 2025. 松辽盆地井水位潮汐周日波震前异常特征及机理分析[J]. 地震研究, 48(2): 237–246, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0025.

Li J Y, Meng L S, Ma L C, et al. 2025. Characteristics and mechanism analysis of the anomaly of the diurnal tidal wave of the well water level before earthquakes in the Songliao Basin[J]. *Journal of Seismological Research*, 48(2): 237–246, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0025.

松辽盆地井水位潮汐周日波震前异常特征及机理分析*

李继业¹, 孟令升¹, 马龙辰¹, 胡澜缤², 任建辉², 周晨¹

(1. 黑龙江省地震局, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨市应急救援保障中心, 黑龙江 哈尔滨 150021)

摘要: 选取松辽盆地黑龙江地区甘南台、延寿台、通河台、肇东台和北林台井水位观测数据, 应用维尼迪科夫调和分析方法进行潮汐分析, 得到了2008—2020年黑龙江及邻区20次中强地震(震群)前, 井水位潮汐周日波异常特征, 并对异常机理进行分析。结果显示: ①松辽盆地中强地震前井水位潮汐周日波存在配套性异常, 主要表现为3个及以上台站同步或准同步异常变化; 统计表明, 优势异常等待时间为5个月, 优势震中距为200~500 km。②地震震级与周日波异常幅度成正比, 与异常等待时间成反比; 地震震级越大, 周日波异常台站空间分布范围就越广。③嫩江断裂附近阿荣旗M5.2、龙江M4.6、嫩江M5.0等地震和依兰—伊通、敦化—密山断裂附近抚松M4.6、鸡东M4.1、友谊M4.2、中俄交界M4.8等地震前, 周日波异常台站空间上呈现“震中—外围”的迁移特征; 在松辽盆地内部, 安达M4.5和前郭M5.8震群、宁江M5.0、M4.5、M5.1地震前, 周日波异常台站空间上呈现“外围—震中”的迁移特征, 分析其原因主要与太平洋板块向我国东北地区的俯冲动力作用有关。

关键词: 井水位; 潮汐响应; 周日波; 松辽盆地

中图分类号: P315.723

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2025)02-0237-10

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2025.0025

0 引言

在引潮力的作用下, 地下含水层发生周期性变形, 导致井水位也呈周期性变化, 表现为水位固体潮汐效应。井水位对含水层潮汐应力(应变)响应(简称井水位潮汐响应), 是井-含水层系统孔隙弹性响应和水力响应的综合(Doan et al, 2016)。有研究表明, 承压、封闭性好的水位观测井可以记录到固体潮, 同时随着含水层体积压缩、膨胀变形, 含水层对固体潮有不同程度响应, 这种有固体潮响应的水位观测井是地壳应变的灵敏指示器(Sun et al, 2019)。这是因为在地震孕育

和发生过程中, 震源区应力积累、断层错动引起应力变化, 使得局部地区地壳介质发生弹性变形, 导致岩体中的孔隙压力和含水层的介质特性发生改变, 进而引起井水位的变化(Shi et al, 2013)。刘序俨等(2009)研究显示, 井水位能灵敏地响应外力作用所引起的含水层介质体应变的微小变化。因此, 在地下水微动态观测中, 利用井水位不同参数的潮汐响应特性, 可以识别出地震前兆信息或地下异常脉动(廖欣等, 2014; 钱建秀等, 2019)。可见, 井水位潮汐响应是探索地震前兆信息的有效手段。

目前, 水位潮汐数据主要是通过维尼迪科夫调和分析方法获得, 该方法采用数字频率滤波器对观

* 收稿日期: 2024-05-27.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划攻关项目(XH19011); 地震预测开放基金项目(XH22035D).

第一作者简介: 李继业(1981-), 高级工程师, 主要从事地下流体和地震综合预测、前兆机理研究.

E-mail: jiye_li@126.com.

测数据进行滤波,得到日波或半日波群中的振幅比或潮汐因子等参数,基本不受降水、气压等因素的影响(王玥琪,杨立明,2015)。目前,松辽盆地数字化井水位潮汐地震前兆异常研究尚处于起步阶段,李继业等(2023)使用该方法对2017—2019年吉林松原宁江3次 $M \geq 5.0$ 中强地震前潮汐响应周日波异常进行了提取与分析,并结合震源区 $M_L \geq 3.0$ 小地震调制比异常,探讨了周日波异常与小地震调制作用的关系,取得了较好的效果。

为进一步拓展该方法在松辽盆地及周边地区显著地震前的震兆效能,本文以松辽盆地作为一个整体的构造单元,使用维尼迪科夫调和分析方法提取松辽盆地井水位潮汐全日波群中周日波潮汐因子变化特征,分析潮汐响应与中强地震的关系,以期获取周日波异常在中强地震前兆研究中的应用效能,为松辽盆地中强地震预测研究提供参考。

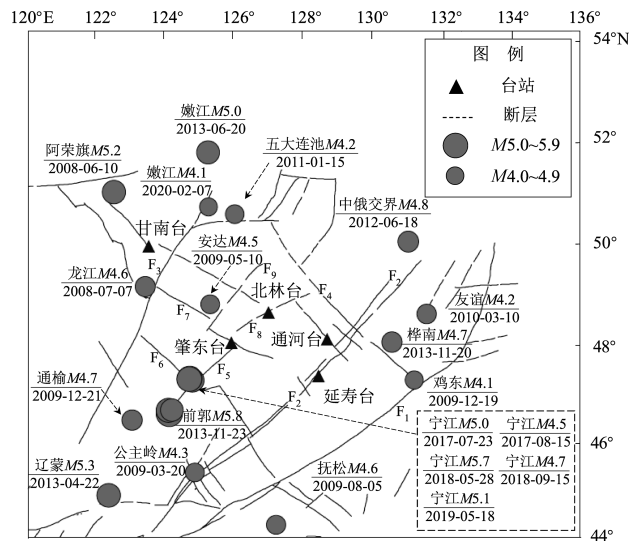
1 研究区概况及观测井选取

松辽盆地是中国大陆六大活动盆地之一,是东北地区地震活动水平最高的地质构造单元。据史料记载,1119年松辽盆地曾发生吉林前郭 $M6\frac{3}{4}$ 地震(吴戈等,1988)。自有地震仪器观测记录以来,1941年和1942年黑龙江绥化两次 $M6$ 地震以及1986年黑龙江德都 $M5.5$ 震群均发生在松辽盆地(国家地震局震害防御司,1995)。近20年来,松辽盆地中强地震活动水平显著增强,相继发生了2005年黑龙江林甸 $M5.1$ 、2006年吉林乾安 $M5.0$ 、2013年吉林前郭 $M5.8$ 震群以及2017—2019年吉林宁江 $M5.0$ 、 $M5.7$ 、 $M5.1$ 等地震。

松辽盆地总体呈NE向展布,断裂构造发育,主要有NW向展布的第二松花江断裂、滨州断裂和NE向展布的扶余—肇东断裂、呼兰河断裂、依兰—伊通断裂和嫩江断裂(图1)。该盆地构造活动十分活跃,尤其是新生代以来火山活动强烈,地震频发(邵济安等,2010)。

本文使用2008—2020年松辽盆地20次 $M \geq 4.0$ 中强地震(震群)地震目录^①。井水位潮汐分析观测井选取原则:①水位固体潮清晰、气压效

应明显;②水位动态稳定,年度数据连续率、完整率均在90%以上;③观测井孔条件好,周边环境干扰少,受降雨影响小;④观测井位于构造断裂上或构造交会处附近(李继业等,2023)。最终确定采用位于滨州断裂与扶余—肇东断裂交会附近的肇东台、呼兰河断裂附近的北林台、嫩江断裂与阿伦河断裂交会附近的甘南台以及依兰—伊通断裂附近的延寿台、通河台水位观测数据,进行潮汐分析(图1)。



F₁: 敦化—密山断裂; F₂: 依兰—伊通断裂; F₃: 嫩江断裂; F₄: 南北河—勃利断裂; F₅: 扶余—肇东断裂; F₆: 第二松花江断裂; F₇: 滨州断裂; F₈: 呼兰河断裂; F₉: 任民—海伦断裂

图1 松辽盆地区域断裂、地震和选用台站空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of regional faults, earthquakes and selected stations in the Songliao Basin

2 数据预处理

水位观测数据中包含着天体运动对地球作用引起的地形变信息以及大气压、地温、降雨、地表负荷等外部环境信息和仪器漂移等观测系统信息。水位观测数据中的阶变、脉冲和缺数等均会对潮汐因子的计算精度产生影响。为避免因干扰数据对潮汐分析带来的影响,需对气压、远场强震影响、周边环境干扰、仪器维修、电源故障、

① 国家地震科学数据共享中心, <https://data.earthquake.cn/>。

系统漂移等原因造成的数据脉冲、阶跃等进行预处理（刘春平等，2017）。

首先对黑龙江甘南台、延寿台、通河台、肇东台和绥化北林台的水位原始数据进行预处理，结合各台站观测日志和观测环境调查，对水位原始数据中有明确干扰源的数据进行预处理，得到剔除气压与降雨后的水位观测数据曲线（图2）；然后将各台站的数据划分为有震年份和无震年份，分别分析其长期变化趋势和正常年变背景，评定数据的质量和观测误差。在5个台站潮汐周日波正常背景值的基础上（李继业等，2023），应用2014年和2015年无显著地震、无明显干扰时段，对5个台站周日波背景值进行校验，取得一致的结果。

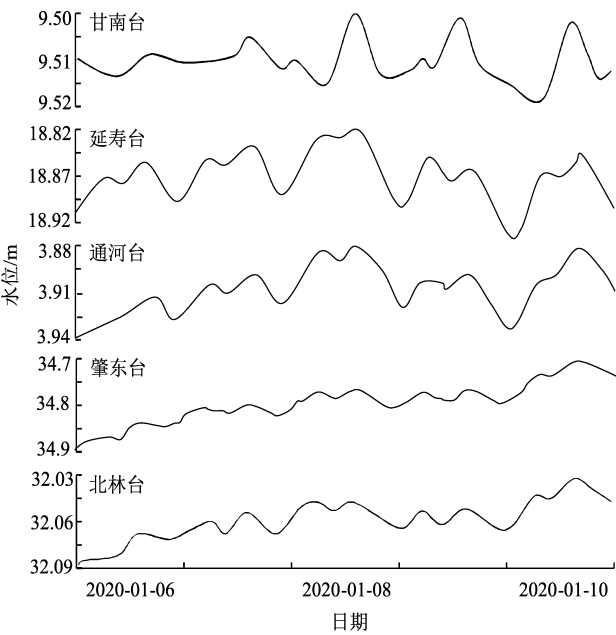


图2 井水位预处理观测数据整点值曲线
Fig. 2 Curves of the preprocessed hourly values the water level in the observation wells

3 计算结果与分析讨论

马宗晋（1980）研究指出，当一个地区的地壳受到板块运动的作用时，地壳中会有多个点发生应力集中，当其中某一点上集中的应力超过地壳岩石强度时，岩石发生破裂而发震。因此，地震前兆异常不只出现在未来震中地区，还会出现在多个应力集中点及附近，且其空间分布也不均一，甚至是断续的。从水位潮汐变化中，以提取与地震孕育有关的含水层变化为主要目的，本文在参考地下流体异常震中距与震级之间定量关系的基础上（中国地震局监测预报司，2020），结合块体构造运动下的整体相关性，将全部异常配套台站作为一个整体的地震前兆异常响应，系统分析周日波异常幅值、等待时间、异常同步特征与松辽盆地中强地震的关系，并给出了优势震中距，这与5~5.9级地震的单台映震范围一般为300 km，4~4.9级地震的单强映震范围一般为200 km的传统认识有所不同。

通过对5个台站数字化水位（整点值）潮汐周日波异常特征进行分析，给出了松辽盆地部分中强地震前井水位潮汐周日波异常特征（表1）。由于篇幅关系，本文仅描述具有代表性的典型异常。

2008年6月10日内蒙古阿荣旗M5.2和7月7日黑龙江龙江M4.6地震前，甘南台、延寿台和北林台井水位，分别于2月22日、3月11日和3月20日出现周日波中期异常（扫描窗长为30 d，滑动步长为48 h，下同）。其中，延寿台异常幅度最大，为背景值2.4倍；甘南台异常出现最早，可能与其距离两次地震震中较近有关，分别为127 km和92 km。

表1 2008—2020年松辽盆地地震信息及相关井水位周日波异常特征
Tab. 1 The earthquakes and anomaly characteristics of the diurnal waves of the water level in the Songliao Basin from 2008 to 2020

地震信息	台站	周日波异常幅	异常峰值与	等待时	震中距/		地震信息	台站	周日波异常幅	异常峰值与	等待时	震中距/	
		度/($\times 10^{-9}$ mm)	背景值之比			km			度/($\times 10^{-9}$ mm)	背景值之比			km
2008年6月10日内蒙古阿荣旗M5.2	甘南台	2.9	1.4	108	127			甘南台	2.9	1.4	135	92	
	延寿台	12.1	2.4	91	598		2008年7月	延寿台	12.1	2.4	118	435	
	通河台	—	—	—	—		7日黑龙江	通河台	—	—	—	—	
	肇东台	—	—	—	—		龙江M4.6	肇东台	—	—	—	—	
	北林台	13.5	2.0	82	380			北林台	13.5	2.0	109	290	

续表 1

地震信息	台站	周日波异常幅 度/($\times 10^{-9}$ mm)	异常峰值与 背景值之比	等待时 间/d	震中距/ km	地震信息	台站	周日波异常幅 度/($\times 10^{-9}$ mm)	异常峰值与 背景值之比	等待时 间/d	震中距/ km
2009 年 3 月 20 日吉林 公主岭 <i>M4.3</i>	甘南台	2.5	1.2	23	510	2013 年 6 月 20 日黑龙江 嫩江 <i>M5.0</i>	甘南台	6.2	3.0	130	250
	延寿台	9.1	1.8	6	355		延寿台	28.6	5.6	102	540
	通河台	13.2	2.5	6	370		通河台	17.1	3.2	102	480
	肇东台	11.6	1.9	10	290		肇东台	—	—	—	—
	北林台	—	—	—	—		北林台	15.8	2.3	102	360
2009 年 5 月 10 日黑龙江 安达 <i>M4.5</i>	甘南台	2.5	1.2	74	208	2013 年 11 月 20 日黑龙江 桦南 <i>M4.7</i>	甘南台	12.8	6.1	86	580
	延寿台	9.1	1.8	57	290		延寿台	7.5	1.5	46	190
	通河台	13.2	2.5	57	275		通河台	—	—	—	—
	肇东台	6.6	1.1	61	80		肇东台	73.3	11.8	80	388
	北林台	—	—	—	—		北林台	—	—	—	—
2009 年 8 月 5 日吉林 抚松 <i>M4.6</i>	甘南台	2.5	1.2	35	700	2013 年 11 月 23 日吉林 前郭 <i>M5.8</i> 震群	甘南台	12.8	6.1	89	380
	延寿台	9.1	1.8	144	350		延寿台	30.9	6.1	49	350
	通河台	13.2	2.5	144	430		通河台	—	—	—	—
	肇东台	8.6	1.4	146	440		肇东台	73.3	11.8	83	204
	北林台	—	—	—	—		北林台	—	—	—	—
2009 年 12 月 19 日黑龙江 鸡东 <i>M4.1</i>	甘南台	6.3	3	93	660	2017 年 7 月 23 日吉林 宁江 <i>M5.0</i>	甘南台	11.7	5.6	147	310
	延寿台	12.8	2.5	102	230		延寿台	—	—	—	—
	通河台	5.9	1.1	102	220		通河台	12.3	2.3	117	318
	肇东台	37.5	6.0	90	420		肇东台	9.4	1.5	125	107
	北林台	21.8	3.2	106	360		北林台	—	—	—	—
2009 年 12 月 21 日吉林 通榆 <i>M4.7</i>	甘南台	6.3	3	95	384	2017 年 8 月 15 日吉林 宁江 <i>M4.5</i>	甘南台	11.7	5.6	160	310
	延寿台	12.8	2.5	104	435		延寿台	—	—	—	—
	通河台	5.9	1.1	104	475		通河台	12.3	2.3	130	318
	肇东台	37.5	6.0	92	280		肇东台	9.4	1.5	128	107
	北林台	21.8	3.2	108	390		北林台	—	—	—	—
2010 年 3 月 10 日黑龙江 友谊 <i>M4.2</i>	甘南台	13.2	6.3	6	625	2018 年 5 月 28 日吉林 宁江 <i>M5.7</i>	甘南台	174	83	74	300
	延寿台	27.9	5.5	183	262		延寿台	204	40	74	280
	通河台	6.2	1.2	183	215		通河台	202	38	74	320
	肇东台	37.5	6.0	171	435		肇东台	7.7	1.2	88	100
	北林台	21.8	3.2	187	342		北林台	—	—	—	—
2011 年 1 月 15 日黑龙江 五大连池 <i>M4.2</i>	甘南台	21.3	10.0	306	193	2018 年 9 月 15 日吉林 宁江 <i>M4.7</i>	甘南台	174	83	185	300
	延寿台	28.0	5.5	290	382		延寿台	204	40	185	280
	通河台	—	—	—	—		通河台	202	38	185	320
	肇东台	—	—	—	—		肇东台	7.7	1.2	199	100
	北林台	13.4	2.0	115	208		北林台	—	—	—	—
2012 年 6 月 18 日中俄 交界 <i>M4.8</i>	甘南台	—	—	—	—	2019 年 5 月 18 日吉林 宁江 <i>M5.1</i>	甘南台	3.2	1.5	87	300
	延寿台	32.4	6.4	92	350		延寿台	11.7	2.3	59	280
	通河台	17.6	3.3	92	280		通河台	8.0	1.5	59	320
	肇东台	—	—	—	—		肇东台	23.7	3.8	71	100
	北林台	12.9	1.9	90	330		北林台	12.8	1.9	30	220
2013 年 4 月 22 日辽蒙 交界 <i>M5.3</i>	甘南台	6.2	3.0	71	570	2020 年 2 月 7 日黑龙江 嫩江 <i>M4.1</i>	甘南台	5.4	2.6	157	250
	延寿台	28.6	5.6	43	530		延寿台	—	—	—	—
	通河台	17.1	3.2	43	600		通河台	5.9	1.1	149	500
	肇东台	—	—	—	—		肇东台	7.1	1.1	127	430
	北林台	15.8	2.3	43	610		北林台	—	—	—	—

注：表中“—”表示无异常。

2013年10月31日、11月22、23日吉林前郭先后发生 $M5.5$ 、 $M5.0$ 、 $M5.3$ 、 $M5.8$ 、 $M5.0$ 地震, 11月20日黑龙江桦南发生 $M4.7$ 地震。前郭震群发生在扶余—肇东断裂南段, 桦南地震发生在依兰—伊通断裂和敦化—密山断裂相夹地块。这两组地震前, 延寿台、甘南台井水位于2月21日出现周日波高值中期异常, 肇东台井水位于9月10日亦出现周日波高值短期异常, 具有一定的同步性。异常台站由东向西、由北向南先后出现, 桦南地震、前郭震群也是由东北向西南迁移, 显示井水位潮汐响应周日波异常存在向未来震中迁移的特征。距离前郭震群最近(204 km)的肇东台水位潮汐周日波最晚出现高值异常, 异常幅度达 $73.3 \times 10^{-9} \text{ mm}$, 为正常背景值的11.8倍, 这可能与肇东台与前郭震群位于同一条发震断裂有关。

2018年5月28日吉林宁江发生 $M5.7$ 地震, 较上一次 $M5.0$ 地震间隔10个月, 此次地震震中位于扶余—肇东断裂与第二松花江断裂交会处。地震前, 肇东台、甘南台、延寿台、通河台井水位分别于2月28日、3月14日出现周日波高值中期异常, 其中甘南台、延寿台、通河台异常幅度分别是正常背景值的83、40、38倍, 异常形态高度一致, 且具有较好的同步性(李继业等, 2023)。值得注意的是, 位于扶余—肇东断裂的肇东台(震中距100 km)最早出现异常, 但异常幅度仅略高于正常背景值。

3.1 地震震级与异常幅度关系

潮汐因子主要反映地壳介质对引潮力响应的弹性状态(乔子云, 陈建国, 2001)。水位周日波潮汐因子是评判承压水位对地球应变固体潮响应灵敏度的重要参数之一, 潮汐因子越大, 井水位变化对潮汐响应的灵敏度越高。与波速比一样, 潮汐因子也是介质力学参数的函数, 也可以应用于地震预测研究中。研究表明, 膨胀区的波速比变化达15%时, 倾斜潮汐因子变化可达50%(Beaumont, Berger, 1974)。

由表1可见, 松辽盆地20次中强地震中有16次震前不同台站周日波异常出现时间同步、形态一致特征, 且地震震级越大, 周日波异常幅度也越大。以台站为例, 安达 $M4.5$ 、宁江 $M5.1$ 和前郭 $M5.8$ 地震前, 肇东台周日波异常幅值分别为正

常背景值的1.1、3.8和11.8倍。以地震为例, 安达 $M4.5$ 地震前, 延寿、通河、甘南台周日波异常幅值仅为正常背景值1.8、2.5、1.2倍; 嫩江 $M5.0$ 地震前, 延寿、通河、甘南台周日波异常幅值为正常背景值5.6、3.2、3.0倍; 宁江 $M5.7$ 地震前, 延寿、通河、甘南台周日波异常幅值可达正常背景值40、38、83倍。

3.2 地震震级与异常等待时间关系

地壳介质物性参数变化可用于分析地震前地壳岩石的弹性状态, 判定孕震区应力演化由线性进入非线性阶段的短期特征(张晶, 张立, 2003)。异常等待时间是指井水位潮汐周日波异常出现, 与未来中强地震发震时刻之间的时间间隔, 这个时间段通常反映了地震前孕震区应力调整过程。对地倾斜突变与地震关系的研究结果表明: 在应力应变积累达到峰值后, 地震震级越大, 距离发震的时间间隔通常就越短(牛安福, 2003)。从松辽盆地中强地震前井水位周日波异常等待时间的分析结果(图3a)可看出, 震级越大, 异常等待时间越短, 根据震例总结得到初步统计经验公式为:

$$D = 1\ 050 - 180M \quad (1)$$

式中: D 为异常等待时间; M 为震级。

式(1)震级的适用范围为 $M4.0 \sim 6.0$, 依据该公式可知: $M4.0$ 地震等待时间不超过1年, $M4.5$ 地震的等待时间不超过8个月, $M5.0$ 地震的等待时间不超过5个月, $M5.5$ 地震的等待时间不超过3个月, $M6.0$ 地震的不超过1个月。由图3a可见: 各台站异常等待时间在5个月内的占84%, 3个月内的占47%, 多表现为中、短期异常特征。

3.3 地震震级与异常空间范围关系

强震孕育可能涉及非常大的地壳空间范围(车用太等, 2002)。对松辽盆地中强地震前井水位周日波异常空间范围进行分析, 结果如图3b所示。从图中可见, 震级越大, 周日波异常空间分布范围越广, 其中, 甘南台井水位周日波异常映震距离最广, 肇东台映震距离最近。根据震例总结, 初步统计经验公式如下:

$$\Delta = 160M - (390 \pm 150) \quad (2)$$

式中: Δ 为震中距; M 为震级, 拟合优度为0.7。

其中与经验公式拟合较好的是通河台、北林台、延寿台, 优势震中距为 200 ~ 500 km, 尤其是 2013 年前郭 $M5.8$ 震群和 2017、2018、2019 年宁江 $M5.0$ 、 $M5.7$ 、 $M5.1$ 地震均位于优势震中

距内。总之, 地震孕育过程的复杂性、区域构造背景的差异性和地壳介质的各向异性等因素, 会对孕震区潮汐响应特征产生影响, 还需要更多的震例才能更加清晰、准确地给出统计经验公式。

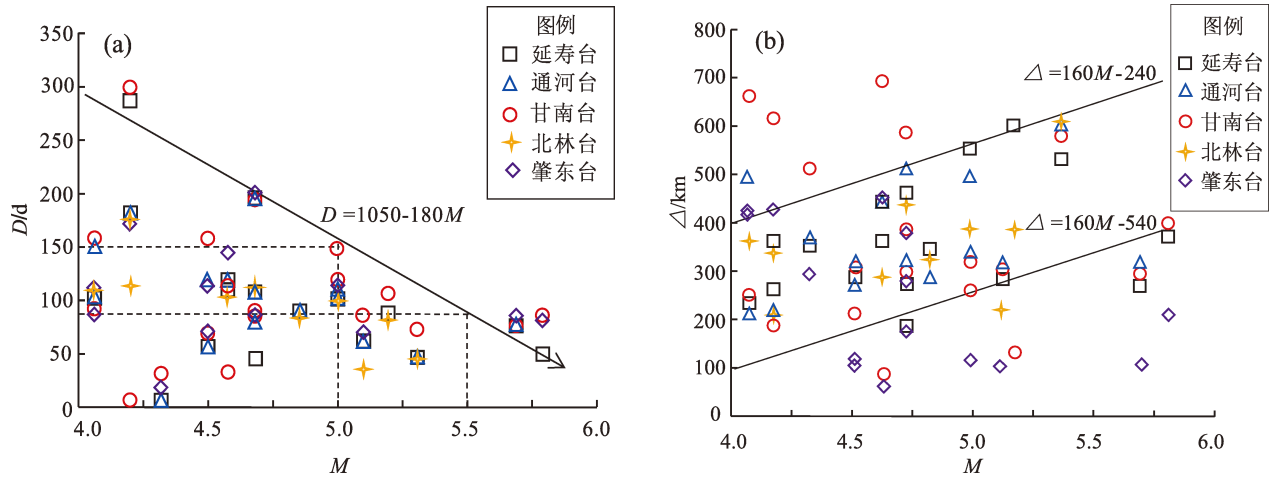


图3 松辽盆地中强地震震级与井水位周日波异常等待时间 (a)、空间范围 (b) 关系

Fig. 3 The relationship between magnitude and waiting time (a) and spatial range (b) of the anomaly of the diurnal wave of the weekly water level in the Songliao Basin

3.4 异常同步特征

异常同步特征是指多个台站的井水位潮汐周日波, 在震前半年出现同步或准同步异常, 主要衡量指标是出现异常的台站数量和异常空间迁移方向。由表2可见, 每次地震前至少有3个台站井水位出现同步或准同步周日波异常, 最多可达5个台站。周日波异常空间迁移方式主要有两种, 一种是周日波异常由震中向外围迁移, 即距离震中相对近的台站最先出现周日波异常, 而位于松辽盆地内部或盆地另一侧、相对远的台站最后出现异常, 尤其是嫩江断裂附近阿荣旗 $M5.2$ 、龙江 $M4.6$ 、辽蒙交界 $M5.3$ 、嫩江 $M5.0$ 等地震和依兰—伊通、敦化—密山断裂附近的抚松 $M4.6$ 、鸡东 $M4.1$ 、友谊 $M4.2$ 、中俄交界 $M4.8$ 等地震前, 异常主要表现为“震中—外围”迁移特征, 占比为 11/20。另一种周日波异常为由外围向震中迁移, 即距离震中相对近的台站最后出现周日波异常, 尤其是黑龙江安达 $M4.5$ 和吉林前郭 $M5.8$ 震群、宁江 $M5.0$ 、 $M4.5$ 、 $M5.1$ 地震前, 主要表现为“外围—震中”迁移特征, 占比为 9/20。此外, 每次地震前周日波异常跨度在时间上也存在差异,

1个月以内的异常占80%, 6个月以内的异常占95%, 最长异常跨度为6.8个月。

3.5 异常机理分析

地球固体潮能够反映地壳介质物性变化: 当地壳介质应力状态和外部观测环境保持不变时, 潮汐响应参数变化较为稳定, 周日波等潮汐因子仅在很小范围内波动。当地壳应力应变积累到一定程度, 地壳介质的力学状态发生明显改变, 其物性和潮汐响应特征也会随之发生显著变化 (范桂英等, 2001), 并可能在一定范围内出现多个潮汐因子异常。这是由于地壳被深大断裂切割成多个地块, 地震多发生在块体边界上, 块体规模越大, 可能出现潮汐因子异常的范围就越大 (郭增建, 秦保燕, 1979)。潮汐因子反映了地壳介质对引潮力响应的弹性状态。中强地震前, 随着孕震区应力水平不断增强, 地壳介质的应力状态也会发生改变, 当孕震区应力应变进入失稳阶段, 地下含水层也会随之变形, 基于数字化水位连续观测资料, 采用适合的调和分析方法, 便有可能提取不同频段的潮汐因子异常信息, 进一步分析地壳介质的应力应变特征, 突出地震短期

表 2 松辽盆地中强地震前水位周日波异常同步特征

Tab. 2 The characteristics of anomaly synchronization of the diurnal wave of the water level before the medium- and strong-earthquakes in the Songliao Basin

实发地震	异常台数	最先出现异常台站	异常日期	最后出现异常台站	异常日期	异常跨度/d	异常迁移方向
内蒙古阿荣旗 5.2 级	3	甘南	2008 - 02 - 22	北林	2008 - 03 - 20	27	震中 - 外围
黑龙江龙江 4.6 级	3	甘南	2008 - 02 - 22	北林	2008 - 03 - 20	27	震中 - 外围
吉林公主岭 4.3 级	4	甘南	2009 - 02 - 25	延寿、通河	2009 - 03 - 14	18	外围 - 震中
黑龙江安达 4.5 级	4	甘南	2009 - 02 - 25	延寿、通河	2009 - 03 - 14	18	外围 - 震中
吉林抚松 4.6 级	4	肇东	2009 - 03 - 12	甘南	2009 - 07 - 01	109	震中 - 外围
黑龙江鸡东 4.1 级	5	延寿、通河	2009 - 09 - 08	肇东	2009 - 09 - 28	21	震中 - 外围
吉林通榆 4.7 级	5	延寿、通河	2009 - 09 - 08	肇东	2009 - 09 - 28	21	外围 - 震中
黑龙江友谊 4.2 级	5	延寿、通河	2009 - 09 - 08	甘南	2010 - 03 - 04	176	震中 - 外围
黑龙江五大连池 4.2 级	3	甘南	2010 - 03 - 04	北林	2010 - 09 - 24	204	外围 - 震中
中俄交界 4.8 级	3	延寿、通河	2012 - 03 - 18	北林	2012 - 03 - 20	3	震中 - 外围
辽蒙交界 5.3 级	4	甘南	2013 - 02 - 01	北林、延寿、通河	2013 - 03 - 01	29	震中 - 外围
黑龙江嫩江 5.0 级	4	甘南	2013 - 02 - 01	北林、延寿、通河	2013 - 03 - 01	29	震中 - 外围
黑龙江桦南 4.7 级	3	甘南	2013 - 09 - 05	延寿	2013 - 10 - 05	31	外围 - 震中
吉林前郭 5.8 级震群	3	甘南	2013 - 09 - 05	延寿	2013 - 10 - 05	31	外围 - 震中
吉林宁江 5.0 级	3	甘南	2017 - 02 - 26	通河	2017 - 03 - 28	31	外围 - 震中
吉林宁江 4.5 级	3	甘南	2017 - 02 - 26	通河	2017 - 03 - 28	31	外围 - 震中
吉林宁江 5.7 级	4	肇东	2018 - 03 - 01	甘南、延寿、通河	2018 - 03 - 14	14	震中 - 外围
吉林宁江 4.7 级	4	肇东	2018 - 03 - 01	甘南、延寿、通河	2018 - 03 - 14	14	震中 - 外围
吉林宁江 5.1 级	5	甘南	2019 - 02 - 22	肇东、北林	2019 - 04 - 18	56	外围 - 震中
黑龙江嫩江 4.1 级	3	甘南	2019 - 09 - 01	肇东	2019 - 09 - 29	29	震中 - 外围

异常变化信息，捕捉到有效的地震前兆异常。赵可新等（2022）探讨了汶川地震对含水层水力特征及地下水流运动状态的影响，并对其变化机制进行解释，揭示了井孔 - 含水层系统与地震活动的响应关系。

岩石实验给出了岩石应力 - 应变阶段性变形特征（张晶等，2005）。在地震孕育的后期，岩石变形由线性阶段进入非线性阶段，岩石的物理性质发生明显改变，地下介质出现非弹性变形，受引潮力的响应特性也随之改变，导致与区域构造单元有关的井水位出现潮汐响应配套异常，伴随着应力峰值的出现，震源区进入失稳阶段，周日波配套性异常基本结束，出现异常等待时间，此时孕震系统已经进入非稳定阶段，随时可能发生地震。本文研究发现，松辽盆地井水位潮汐周日波配套异常优势时间不超过 7 个月，异常等待优势

时间为 5 个月，具有短临特征（图 4）。

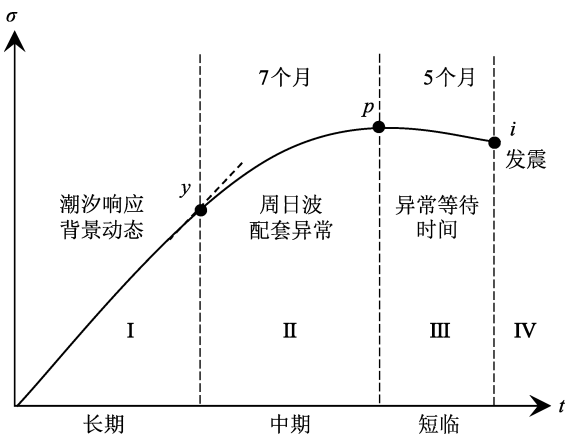


图 4 岩石应力 - 应变阶段性变形与潮汐周日波异常机理分析

Fig. 4 Stress - strain deformation of the rock and mechanism analysis of the anomaly of the diurnal tidal wave

松辽盆地 20 次中强地震前,井水位潮汐周日波异常在盆地周边和盆地内部台站之间反复出现,多表现为异常台站由盆地周边向盆地内部迁移,中强地震可能发生在迁移起始(结束)台站附近或与迁移起始(结束)台站构造相关的区域。这主要与东北地区浅源地震的发生受统一构造应力场的影响,具有清晰的外部动力源有关,即太平洋板块向我国东北地区的俯冲作用(张慧等, 2012)。笔者认为,西太平洋板块俯冲作用对松辽盆地产生了水平向的推挤力和垂直向的上涌力,松辽盆地每一次构造应力调整,均与盆地周边的推挤力和盆地下方的上涌力相互作用有关,当以盆地周边的推挤力为主时,盆地周边台站先于内部台站出现周日波异常,此时位于松辽盆地周边的周日波异常起始台站附近的应力集中点容易得到释放;当以盆地下方的上涌力为主时,松辽盆地内部台站先于周边台站出现周日波异常,此时位于松辽盆地内部的应力集中点就更容易释放。

4 结论

本文使用 2007 年以来黑龙江地区甘南台、延寿台、通河台、肇东台和北林台井水位观测数据,应用维尼迪科夫调和分析方法,提取黑龙江及邻区 20 次中强地震(震群)前,井水位潮汐周日波异常特征,并对异常机理进行分析,得到以下结论:

(1) 松辽盆地中强地震前井水位潮汐周日波存在配套性异常,主要表现为 3 个及以上台站同步或准同步异常变化;统计表明,优势异常等待时间为 5 个月,优势震中距为 200~500 km。

(2) 地震震级与潮汐周日波异常幅度成正比,与异常等待时间成反比,经验公式为: $D = 1\ 050 - 180M$,震级适用范围为 $M4.0 \sim 6.0$ 。地震震级越大,出现异常的台站的震中距越大,井水位周日波异常台站空间分布范围就越广。

(3) 嫩江断裂附近阿荣旗 $M5.2$ 、龙江 $M4.6$ 、嫩江 $M5.0$ 等地震以及依兰—伊通、敦化—密山断裂附近抚松 $M4.6$ 、鸡东 $M4.1$ 、友谊 $M4.2$ 、中俄交界 $M4.8$ 等地震前,周日波异常在空间上均呈现

“震中—外围”迁移特征。在松辽盆地内部,在安达 $M4.5$ 和前郭 $M5.8$ 震群、宁江 $M5.0$ 、 $M4.5$ 、 $M5.1$ 等地震前,周日波异常空间上呈现“外围—震中”的迁移特征。这主要与太平洋板块向我国东北地区的俯冲作用有关。

井水位潮汐周日波异常在松辽盆地中强地震前兆研究中具有较好的应用效果,可作为区域中强地震预测指标进行跟踪。

参考文献:

- 车用太,谷元珠,鱼金子,等. 2002. 昆仑山口西 $M_{\text{s}}8.1$ 地震前地下流体的远场异常及其意义[J]. 地震, 22(4): 106–113.
- Che Y T, Gu Y Z, Yu J Z, et al. 2002. Remote anomalies of subsurface fluid before the $M_{\text{s}}8.1$ earthquake in west of Kunlun Mountain mouth and their significance[J]. Earthquake, 22(4): 106–113. (in Chinese)
- 范桂英, 苏泽云, 丁建国. 2001. 常熟地倾斜固体潮汐调和分析及预报效能[J]. 地震学刊, 21(1): 4–8.
- Fan G Y, Su Z Y, Ding J G. 2001. Harmonic analysis of earth tides using the tiltmeter records taken at the Changshu, Jiangsu seismic station and its efficiency in earthquake prediction[J]. Journal of Seismology, 21(1): 4–8. (in Chinese)
- 郭增建, 秦保燕. 1979. 震源物理[M]. 北京: 地震出版社.
- Guo Z J, Qin B Y. 1979. Physics of earthquake source[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 国家地震局震害防御司. 1995. 中国历史强震目录(公元前 23 世纪—公元 1911 年)[M]. 北京: 地震出版社.
- Department of Earthquake Disaster prevention, State Seismological Bureau. 1995. Catalogue of Chinese historical strong earthquakes (23rd century B. C. to 1911 A. D.) [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 李继业, 晏锐, 张思萌, 等. 2023. 井水位潮汐响应与小地震调制作用的关系[J]. 地震地质, 45(3): 668–688.
- Li J Y, Yan R, Zhang S M, et al. 2023. The relationship between tidal response of well water level and modulation of small earthquakes[J]. Seismology and Geology, 45(3): 668–688. (in Chinese)
- 廖欣, 刘春平, 石云, 等. 2014. 川 06 井水位固体潮效应变化初探[J]. 地震学报, 36(2): 299–305.
- Liao X, Liu C P, Shi Y, et al. 2014. Changes in solid tidal effect of water level in the well Chuan 06[J]. Acta Seismologica Sinica, 36(2): 299–305. (in Chinese)
- 刘春平, 廖欣, 石云, 等. 2017. 地壳应力与地下水动力响应[M]. 北京: 地震出版社.
- Liu C P, Liao X, Shi Y, et al. 2017. Crustal stress and groundwater dynamic response[M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- 刘序严, 郑小菁, 王林, 等. 2009. 承压井水位观测系统对体应变的响应机制分析[J]. 地球物理学报, 52(12): 3147–3157.
- Liu X Y, Zheng X Q, Wang L, et al. 2009. Response analysis of the well -

- water – level system in confined aquifer[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(12): 3147 – 3157. (in Chinese)
- 马宗晋. 1980. 华北地壳的多(应力集中)点场与地震[J]. 地震地质, 2(1): 39 – 47.
- Ma Z J. 1980. Multipoints (concentrated) stress field and earthquakes in north China crust [J]. Seismology and Geology, 2(1): 39 – 47. (in Chinese)
- 牛安福. 2003. 地倾斜变化的突变性及与地震关系的研究[J]. 地震学报, 25(4): 441 – 445.
- Niu A F. 2003. Study on the sudden changes in ground tilt and earthquakes [J]. Acta Seismologica Sinica, 25(4): 441 – 445. (in Chinese)
- 钱建秀, 刘春平, 樊春燕, 等. 2019. 地震前后井 – 含水层系统潮汐参数变化特征分析——以云南弥勒井为例[J]. 中国地震, 35(1): 169 – 181.
- Qian J X, Liu C P, Fan C Y, *et al.* 2019. Analysis of tidal parameters variation in the well – aquifer system before and after the earthquake; a case study of the Mile well in Yunnan Province [J]. Earthquake Research in China, 35(1): 169 – 181. (in Chinese)
- 乔子云, 陈建国. 2001. 应变固体潮 NaKai 拟合检验及潮汐变化的映震效果[J]. 地震, 21(3): 85 – 90.
- Qiao Z Y, Chen J G. 2001. The earthquake – reflecting effect of NaKai fitting and tidal analysis of earth strain tide data [J]. Earthquake, 21(3): 85 – 90. (in Chinese)
- 邵济安, 赵谊, 张福松, 等. 2010. 黑龙江省中西部地球排气与地震活动的探讨[J]. 岩石学报, 26(12): 3651 – 3656.
- Shao J A, Zhao Y, Zhang F S, *et al.* 2010. Discussions on earth degassing and seismic activities in central west Heilongjiang Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 26(12): 3651 – 3656. (in Chinese)
- 王玥琪, 杨立明. 2015. 维尼迪科夫调和解析对大甸子井水位潮汐因子和相位的气象影响研究[J]. 地震工程学报, 37(1): 255 – 259.
- Wang Y Q, Yang L M. 2015. Meteorological influence of Venedikov harmonic analysis method on tidal factor and phase of the Dadianzi well water level [J]. China Earthquake Engineering Journal, 37(1): 255 – 259. (in Chinese)
- 吴戈, 房贺岩, 李志田, 等. 1988. 1119 年前郭地震考察与研究[J]. 东北地震研究, 4(1): 67 – 76.
- Wu G, Fang H Y, Li Z T, *et al.* 1988. The investigation and study of Qian-guo earthquake, 1119 [J]. Northeastern Seismological Research, 4(1): 67 – 76. (in Chinese)
- 张慧, 焦明若, 刘峡. 2012. 太平洋板块俯冲对中国东北深浅震影响机理的数值模拟[J]. 地震, 32(2): 135 – 141.
- Zhang H, Jiao M R, Liu X. 2012. Numerical simulations of the influencing mechanism of the Pacific Plate subduction to NE China on deep and shallow earthquakes [J]. Earthquake, 32(2): 135 – 141. (in Chinese)
- 张晶, 牛安福, 高福旺, 等. 2005. 固体潮汐参数变化与地震关系研究[J]. 大地测量与地球动力学, 25(3): 86 – 90.
- Zhang J, Niu A F, Gao F W, *et al.* 2005. Study on relationship between earth tide parameters and earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 25(3): 86 – 90. (in Chinese)
- 张晶, 张立. 2003. 强震前形变固体潮汐资料短期信息的提取[J]. 地震, 23(3): 71 – 78.
- Zhang J, Zhang L. 2003. Short – term anomaly extracted from tidal deformation data before moderately strong earthquakes [J]. Earthquake, 23(3): 71 – 78. (in Chinese)
- 赵可新, 兰双双, 谷洪彪, 等. 2022. 基于井水位潮汐响应探讨含水层的水力特征及其变化[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 20(4): 802 – 813.
- Zhao K X, Lan S S, Gu H B, *et al.* 2022. Discussion on hydraulic characteristics and changes of aquifer based on tidal response of well water level [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 20(4): 802 – 813. (in Chinese)
- 中国地震局监测预报司. 2020. 地下流体分析预测技术方法工作手册[M]. 北京: 地震出版社.
- Monitoring and Forecasting Department, China Earthquake Administration. 2020. Administration Working manual on underground fluid analysis and prediction techniques and methods [M]. Beijing: Seismological Press. (in Chinese)
- Beaumont C, Berger J. 1974. Earthquake prediction; Modification of the earth tide tilts and strains by dilatancy [J]. Geophysical Journal International, 39(1), doi:10.1111/j.1365-246X.1974.tb05441.x.
- Doan M L, Brodsky E E, Prioul R, *et al.* 2006. Tidal analysis of borehole pressure; a tutorial [R]. Schlumberger Research Report, 34 – 35.
- Shi D C F, Wu Y M, Chang C H. 2013. Significant coherence for groundwater and Rayleigh waves; Evidence in spectral response of groundwater level in Taiwan using 2011 Tohoku earthquake, Japan [J]. Journal of Hydrology, 486(1): 57 – 70.
- Sun X L, Xiang Y, Shi Z M, *et al.* 2019. Sensitivity of the response of well – aquifer systems to different periodic loadings; A comparison of two wells in Huize, China [J]. Journal of Hydrology, 572: 121 – 130.

Characteristics and Mechanism Analysis of the Anomaly of the Diurnal Tidal Wave of the Well Water Level before Earthquakes in the Songliao Basin

LI Jiye¹, MENG Lingsheng¹, MA Longchen¹, HU Lanbin², REN Jianhui², ZHOU Chen¹

(1. Heilongjiang Earthquake Agency, Harbin 150090, Heilongjiang, China)

(2. Harbin Technical Center of Earthquake Prevention and Disaster Reduction, Harbin 150021, Heilongjiang, China)

Abstract

Underground fluid plays a vital role in the process of the earthquake genesis and occurrence. In this paper, the observational data of the water level at Gannan station, Yanshou station, Tonghe station, Zhaodong station, and Beilin station in the Songliao Basin of Heilongjiang Province are selected, and the tidal analysis is carried out by using Venedikov harmonic analysis method. Before 20 moderate- and strong-earthquakes (including earthquake swarms) in Heilongjiang and its adjacent areas from 2008 to 2020, the anomaly characteristics of the tidal diurnal wave of the water level in the wells are obtained, and the anomaly mechanism is analyzed. The results show that: ① There is a matching anomaly of daily tidal wave of the water level in the wells before moderate-and strong-earthquake in Songliao Basin, mainly represented by the synchronous and morphologically consistent anomaly of the water level appeared at three or more stations; The lasting time of the dominant anomaly is 5 months, and the most probable epicenter lies within 200 – 500 km. ② It is found that the earthquake magnitude is directly proportional to the amplitude of the diurnal wave and inversely proportional to the lasting time of the anomaly. Statistics show that the wider the spatial distribution ranges of the stations which have diurnal wave anomaly, the larger the earthquake magnitude. ③ Before the Arogqi $M5.2$ earthquake, Longjiang $M4.6$ earthquake, and Nenjiang $M5.0$ earthquake near the Nenjiang fault and the Fusong $M4.6$ earthquake, Jidong $M4.1$ earthquake, Youyi $M4.2$ earthquake and Sino-Russian border $M4.8$ earthquake near the Yilan-Yitong fault and Dunhua-Mishan fault, the anomalous diurnal wave of the water level appeared at stations showed order of “from the epicenter to the surrounding areas”. In the Songliao Basin, before the Anda $M4.5$ earthquake, Qianguo $M5.8$ earthquakes, Ningjiang $M5.0$ earthquake, Ningjiang $M4.5$ earthquake, and Ningjiang $M5.1$ earthquake, the anomalous diurnal wave of the water level appeared at stations showed order of “from the surrounding areas to the epicenter”. The phenomenon is mainly related to the dynamic action of the Pacific Plate subducting to Northeast China.

Keywords: well water level; tidal response; diurnal wave; the Songliao Basin