

李慧峰, 钟羽云, 李志海, 等. 利用宁波水文地质监测井网建设地下流体前兆台阵的试验研究[J]. 地震工程学报, 2021, 43(5): 1103-1111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1103

LI Huifeng, ZHONG Yuyun, LI Zhihai, et al. Experimental study on the construction of underground fluid precursor array with Ningbo hydrogeological monitoring well network[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(5): 1103-1111. DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1103

# 利用宁波水文地质监测井网建设地下流体前兆台阵的试验研究

李慧峰<sup>1</sup>, 钟羽云<sup>2</sup>, 李志海<sup>3</sup>, 袁宝珠<sup>2</sup>, 李 蒙<sup>1</sup>

(1. 宁波地震监测中心站, 浙江 宁波 315029; 2. 浙江地震台, 浙江 杭州 310013;  
3. 宁波市应急管理局, 浙江 宁波 315066)

**摘要:** 从宁波水文地质监测井网中遴选了北仑井和慈溪井进行水位和水温试验性观测, 分析计算水位的气压效率、降雨载荷效应和潮汐因子, 并与同处于宁波盆地映震效果较好的庄市井的相应参数进行对比。结果表明: (1) 3 口水井的水位变化在时间和空间上均有很好的相关性, 水位异常动态与其影响因素之间存在很好的成因上的关联; (2) 慈溪井的降雨载荷系数比庄市井和北仑井的大约小一个量级, 这可能与慈溪井位于 1960 年代围海造田的滩涂地有关; (3) 水井网均位于含有多个含水层的宁波盆地, 为在同一构造中开展不同含水层观测和基础研究提供了可能, 可以从井网中遴选出合格的地震前兆监测井, 用于建设宁波盆地地震前兆流体台阵。

**关键词:** 宁波盆地; 地震监测; 地下流体; 台阵

中图分类号: P315.72

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2021)05-1103-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2021.05.1103

## Experimental study on the construction of underground fluid precursor array with Ningbo hydrogeological monitoring well network

LI Huifeng<sup>1</sup>, ZHONG Yuyun<sup>2</sup>, LI Zhihai<sup>3</sup>, YUAN Baozhu<sup>2</sup>, LI Meng<sup>1</sup>

(1. Ningbo Earthquake Monitoring Central Station, Ningbo 315029, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Seismological Station, Hangzhou 310013, Zhejiang, China;

3. Bureau of Emergency Management of Ningbo, Ningbo 315066, Zhejiang, China)

**Abstract:** The water level and water temperature of Beilun and Cixi wells from Ningbo hydrogeological monitoring well network were observed for the experimental study. The pressure efficiency of water level, the rainfall load effect, and the tidal factor of the two wells were calculated and compared with those of Zhuangshi well. The results showed that: (1) The water level changes of three wells have a good correlation in time and space, and there is a good genetic correlation between water level anomaly and its influencing factors. (2) The rainfall load factor of Cixi well is

收稿日期: 2021-05-21

基金项目: 中国地震局三结合项目提升性课题(3JH-201902014)

第一作者简介: 李慧峰(1970-), 男, 工程师, 主要从事地震监测工作。E-mail: 723764472@qq.com。

about an order of magnitude smaller than those of Zhuangshi and Beilun wells, which may be related to the location of Cixi well. (3) The wells are located in the Ningbo Basin with multiple aquifers, which makes it possible to carry out observation and basic research of different aquifers in the same structure. Qualified seismic precursor monitoring wells can be selected from the network for the construction of seismic precursor fluid array in the Ningbo Basin.

**Keywords:** Ningbo Basin; earthquake monitoring; underground fluid; array

## 0 引言

作为地震前兆监测的重要学科之一,地下流体观测能够获取丰富的地球动力作用信息,如潮汐现象、构造活动、地震波、地震前兆及其他地球内外动力作用等信息,同时还能够得到环境(例如温度、气体循环)和资源(例如水资源储量与质量)变化信息,为相关的灾害、环境、资源问题的分析和研究提供重要的科学数据<sup>[1-3]</sup>。由于流体具有很强的信息传递能力,地下流体观测在地震短临预测预报中占有比较重要的地位。因此,地下流体观测基础研究和实用技术研究是地震预测预报业务发展的重要方向之一<sup>[4]</sup>。

地下水动态在地震预测中的作用与有效性已经得到了越来越多地震工作者的认可<sup>[5-7]</sup>,然而,要在地震发生之前确认地下水前兆异常是一件非常困难的事情,即使是在地震发生之后也往往很难给出科学的确认结果,这主要是由于地下水动态受多种因素的干扰。面对众多的干扰异常,如何对出现的干扰异常进行识别与排除,如何从复杂的干扰背景下提取出地震前兆异常,无疑是当前提高地下水动态监测与地震预测效能十分突出的问题。几十年的监测实践表明,及时识别与排除干扰异常,震前确认地下水异常的前兆性,对于正确把握震情与成功识别前兆异常和预测至关重要,因此地下水异常性质的判别是地震预报工作中非常重要的问题。监测预报人员开展地震前兆异常识别的相关研究,试图建立有效的识别与排除干扰的理论和方法的努力一直没有停止过。车用太等<sup>[8]</sup>认为,地下水动态干扰异常识别需要把握成因、空间、时间和强度等4个方面的相关性,这一研究结果为地下流体观测资料处理和观测站网设计提供了一种思考的方向。要提高异常识别的科学性,除了针对不同特征的干扰信息建立相应的数学模型外,还应布设科学目标清晰、观测条件清楚的观测站网。然而,我国目前地下流体监测台网的布设思路是原则性的,网的结构也较为粗糙,在操作上有较大的随意性<sup>[9]</sup>。建设中存在“因简就陋”的被动建网(台)思想,缺乏科学标准的主动布网

(台)勇气<sup>[10]</sup>。刘耀炜<sup>[10]</sup>认为发展地震地下流体前兆观测台阵是地震地下流体科学优先发展的内容。前兆台阵建设的目的是使地震前兆观测进一步科学化,为地震预测提供具有更加明确科学内涵的前兆资料<sup>[11]</sup>。台阵建设区的选择是台阵建设的关键环节,应该优先选择地质与水文地质条件较为清楚并具有较强的前兆观测基础与有条件扩展新前兆观测条件的地区<sup>[8]</sup>。有专家提出<sup>[12]</sup>,可以在现有地震地下流体台网的基础上,与地质、石油、煤炭、冶金、水利等非地震行业部门合作,利用其现成的资源井孔井,经改造成为地震地下流体观测井,这样既能够节约投入资金,又能较快建设一批新的地震地下流体观测井。2018年宁波地震中心站开始对宁波市水文地质监测井网进行评估和筛选,并对其中的2口水井进行了改造,安装了地下水位水温观测仪器,并依据地震地下流体观测规范进行了并网,开展观测实验研究。

## 1 地下水监测概况

### 1.1 宁波盆地水文地质特征

宁波盆地第四纪沉积层厚度50~110 m,最厚达120 m,第四系中约有6个风化剥蚀面和高海平面形成的三个海浸层位,成因类型复杂,地层从中更新世至全新世均有发育,主要有河流相、河湖相及海相、滨海相等。平原区地下水类型有松散岩类孔隙水、孔隙裂隙水、基岩裂隙水三大类,其中松散岩类孔隙水又可分为孔隙潜水及孔隙承压水两个亚类;基岩裂隙水可分为风化网状裂隙水、构造裂隙水和孔洞裂隙水三个亚类<sup>[13]</sup>。

地下水由山边向盆地、由西南向东海有极缓慢的渗流,根据水文地质勘探资料可分出四个含水层(组),Ⅰ含水层由上更新统中部砂砾石组成,厚度5~15 m,Ⅱ含水层由上更新统底部砂砾石组成,厚度1~15 m,原始水深1~3 m略高于Ⅰ层水位(图1)。Ⅰ、Ⅱ两层在山前合成一层含淡水并与山边淡水带连成一体,在盆地内两层水被黏性土隔开。Ⅰ层水以咸水为主,局部见淡水,咸水形成于早期海侵



下简称庄市井)进行试验观测。

### 2.1 观测井孔水文地质背景

#### 2.1.1 庄市井

宁波镇海庄市 21 井于 1986 年开始进行地震观测,后列入国家局区域地震水位观测基本台网。该井在宁波市镇海区职业教育学校内,观测井坐标 29°56'N,121°36'E(图 2)。该观测井 1972 年成井,终孔 606.14 m,后回填至孔深 170 m 建井保留,其

水文地质条件是宁波盆地的构造裂隙水。2009 年该井进行洗井改造,抽水试验显示,水位降深 15.39 m,涌水量 6.71 L/s。2014 年 12 月,在该井安装 LN-3 型数字水位仪和 SZW-1A 水温仪,水温梯度 100 m 降深开始测试,结果为分段短时间温度变幅相差不大,最终水温探头投放深度为 160 m。图 3 (a)为庄市井地层柱状及管井安装结构图。

从该井多年的观测资料表明,该井水位观测映

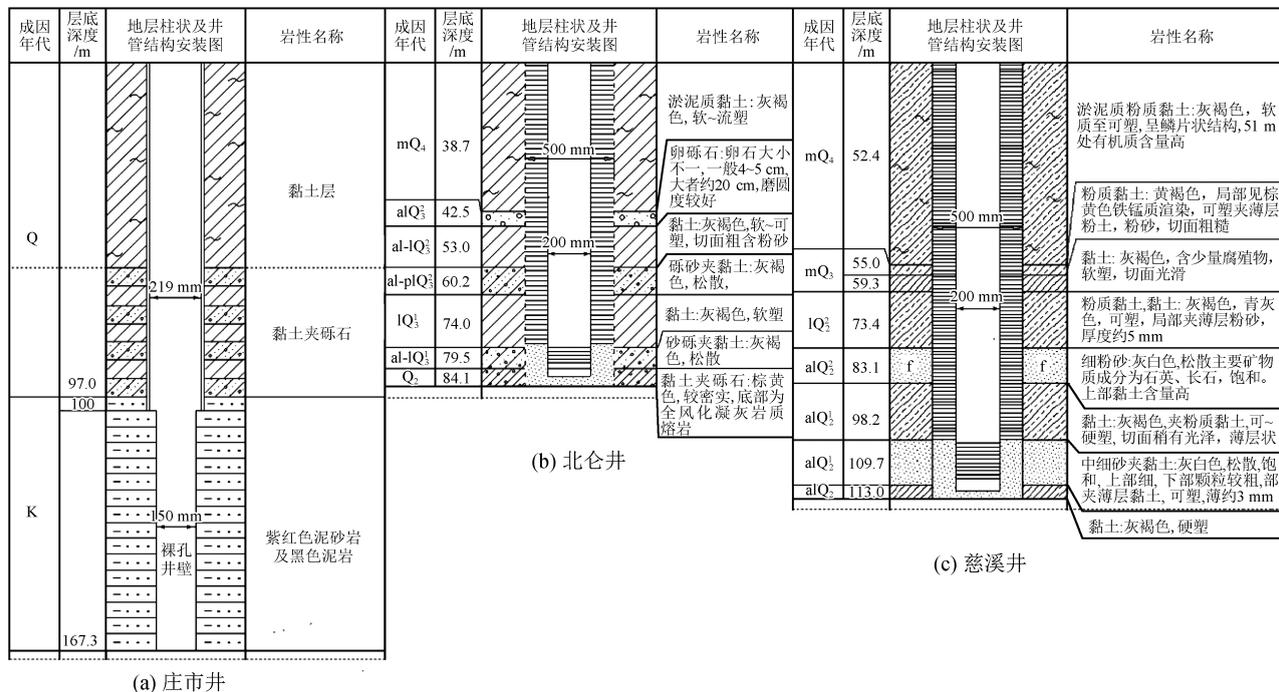


图 3 观测井孔柱状剖面图

Fig.3 Columnar section of three observation wells

震效果较好,1994 年 9 月宁波皎口 4.2 级、1996 年 11 月长江口 6.1 级和 1998 年 8 月嵊州 4.0 级等地震前均出现了趋势性变化异常和水位幅度降低等短临异常<sup>[16-17]</sup>。

#### 2.1.2 试验井

北仑井位于宁波市北仑区天主教堂院内,观测井位于 29°54'N,121°49'E(图 2)。该观测井 2010 年成井,钻孔 84.1 m,球墨铸铁套管至 81.5 m,其中 74.0~79.5 m 为过滤管,79.5~81.5 m 为沉淀管。其水文地质条件特点是:封止地表浅部含层水、38.7~42.5 m 卵砾岩性晚更新统中期冲击层、53.0~60.2 m 砾砂夹黏土岩性晚更新统中期冲击-洪积层;该井观测含水层上层为 74.0~79.5 m 晚更新统早期冲击-湖积层,其岩性为砾石夹黏土,其特征为灰褐色,松散;观测含水层下层为 79.5~84.7 m 中更新统,其岩性为黏土夹砾石,其特征为棕黄色,较密实;底部为全风化凝灰岩质熔岩[图 3

(b)]。该井抽水试验显示,水位降深 1.55 m,涌水量 8.89 L/s,水温梯度 50 m 降深开始测试,结果为分段短时间温度变幅相差不大,最终水温探头投放深度为 80 m。

慈溪井位于慈溪市长河镇,观测井位于 30°18'N,121°10'E(图 2)。该观测井 2010 年成井,钻孔 113.0 m,球墨铸铁套管至 112.0 m,其中 99.0~108.0 m 为过滤管,108.5~112.0 m 为沉淀管。其水文地质条件特点是:封止地表浅部含层水、73.8~83.6 m 松散粉细砂岩性中更新统中期冲击层;该井观测含水层为 98.3~109.7 m 中更新统早期冲击层,其岩性为中细砂夹黏土,其特征为灰白色、松散、饱和、上部细、下部颗粒粗,局部夹薄层黏土、可塑,厚度约 3 mm;底部灰褐色硬塑黏土[图 3(c)]。该井抽水试验显示,水位降深 2.19 m,涌水量 1.56 L/s。水温梯度 60 m 降深开始测试,结果为分段短时间温度变幅相差不大,最终水温探头投放深度

为 105 m。

庄市、北仑、慈溪等 3 孔井水文地质学基础资料齐全,周边无矿区,所在盆地为地下水禁采区,环境良好,观测条件基本符合《地震台站观测环境技术要求第 4 部分:地下流体观测(GB/T 19531.4—

2004)》的要求(表 1)。3 孔观测井内均安装有套管并封闭了非观测层,水管下端设置有沉砂孔,成井后进行了抽水试验和水质简分析。井孔建设基本符合《地震台站建设规范 地下流体台站第 1 部分:水位和水温(DB/T 20.1—2006)》的要求。

表 1 观测井孔水文地质环境条件一览表

Table 1 Hydrogeological environmental conditions of three observation wells				
	井孔名称	庄市井	北仑井	慈溪井
水文地质条件	地形地貌	平原	平原	平原
	含水层分布	层状不清	层状清楚	层状清楚
	酸碱性	中性微碱	中性微碱	中性微碱
	水质状况	Ca-SO <sub>4</sub> ·CL	CL-Na·Ca·Mg	CL-Na·Ca
含水层岩性	岩性种类	基础岩	松散砂土类	松散砂土类
	基本特征	泥砂岩	砾石夹黏土	中细砂夹黏土
含水层透水性	透水性分级	弱透水	弱透水	弱透水
	涌水量	6.71 L/s	8.89 L/s	1.56 L/s
	松散层岩性	不清	上层密实、下层松散	松散

2.2 试验井观测结果

遴选的北仑井、慈溪井与庄市井(地震观测井)同为宁波盆地静水位承压井孔,观测项目均为水位、水温观测,与庄市井相同。仪器选择为中国地震局行业主流观测仪器:水温仪采用 SZW-1A 型系列数字式地热(水温)观测石英温度计,仪器分辨率为 0.000 1 °C<sup>[18]</sup>;水位仪采用 SWY-II 及型 LN-3 型数字式水位仪,分辨率为 1 mm(表 2)。

表 2 井孔观测仪器一览表

Table 2 Observation instruments for three wells			
仪器型号	水温仪	水位仪	仪器安装时间
庄市井	SZW-1A 型	LN-3 型	2014 年 12 月
北仑井	SZW-1A 型	SWY-II 型	2018 年 3 月
慈溪井	SZW-1A 型	LN-3 型	2018 年 5 月

兆观测,将两孔井 4 个测项数据与庄市 21 号井的资料进行对比分析。2019 年 9 月 3 孔井 6 套设备运行稳定,在气象条件上有降雨和气压变化明显等自然现象,采用此时间段内数据有助分析试验井监测能力。

2.2.1 水温数据对比

图 4 为 2019 年 9 月北仑、慈溪和庄市 3 孔井水温数据分钟值曲线。从图中可知,3 孔井的水温数值离散度相近,观测数据动态波动幅度相近。由于水温观测非常复杂,不仅与观测井有关,即使同一口井不同层位观测,观测数据差异性很大。另外该型号还存在仪器本身的系统误差,有同井孔同埋深两套仪器存在数值较大差异的现象<sup>[19]</sup>,因此背景数值上存在差异。

为了分析地质环境监测井是否可以用于地震前

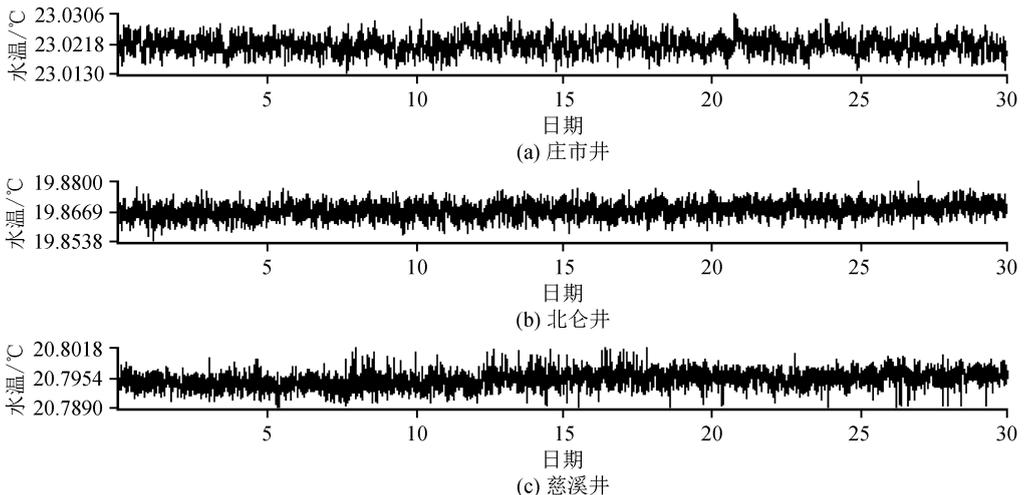


图 4 宁波盆地 3 孔井水温分钟值记录曲线

Fig.4 Minute value curve of water temperature of three wells in Ningbo Basin

### 2.2.2 水位数据对比

图 5 为 2019 年 9 月庄市、北仑、慈溪等 3 孔井水位数据分钟值曲线及其傅里叶频谱。图中显示 3 孔井水位分钟值曲线均含有低频和半日波频率 2 个优势频率成分。半日波频率反映了 3 孔水井均能记录到清晰的半日周期固体潮,但固体潮幅度有差异,庄市井幅度最大,北仑井次之,慈溪井最小。低频成

分可能反映了 2 次降雨引起的水位变化,3 孔井水位变化趋势相近但局部存在差异,特别是在 21 日降雨载荷变化上尤为明显,可能是雨量载荷在地质覆盖层介质差异性的体现。此外,庄市井水位分钟值曲线还包含有较为明显的日波频率成分,说明该井水位能够较好地记录到日波固体潮汐,其他 2 口井则记录不明显。

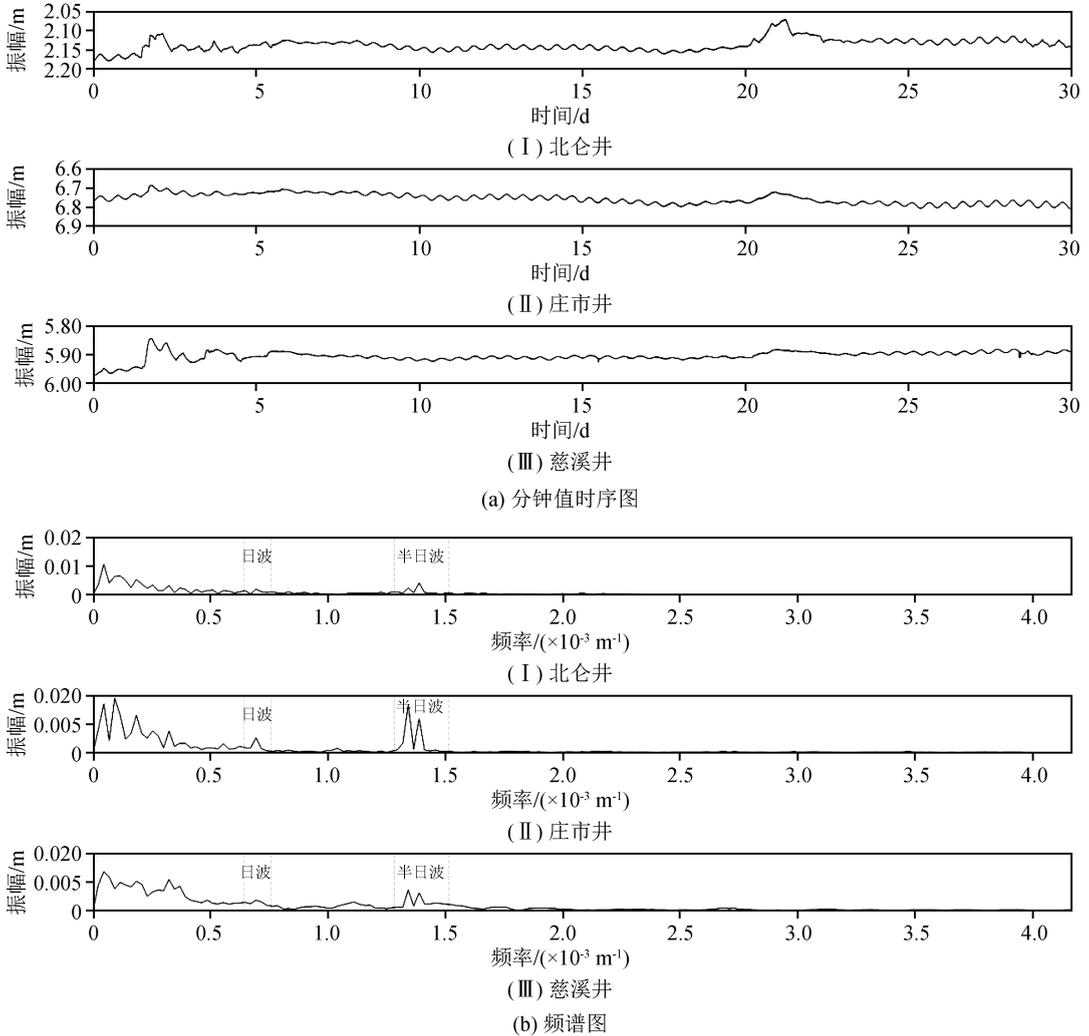


图 5 宁波盆地 3 孔井静水位分钟值曲线及其傅里叶频谱

Fig.5 Minute value curve and Fourier spectrum of static water level of three wells in Ningbo Basin

### 2.3 试验井评价

计算北仑井和慈溪井水位的气压效率、降雨载荷效应及潮汐因子,并与庄市井的相应参数进行对比,分析水位气压与含水层覆盖层压缩系数的差异性,并对观测精度进行评价<sup>[20]</sup>

#### 2.3.1 气压效应

2019 年 9 月 10—20 日水位无降水影响,使用别尔采夫滤波方法将水位、气压小时值观测序列的

趋势项和低频部分分离出来,计算该时间段内 3 孔井的气压校正值,即

$$\bar{y}_t = \frac{1}{15} (y_t + y_{t+2} + y_{t-2} + y_{t+3} + y_{t-3} + y_{t+5} + y_{t-5} + y_{t+8} + y_{t-8} + y_{t+10} + y_{t-10} + y_{t+13} + y_{t-13} + y_{t+18} + y_{t-18}) \quad (1)$$

式中: $\bar{y}_t$  为序列的低频项; $y_t - \bar{y}_t$  为高频项。当在分析时段内水位出现趋势上升或下降等长趋势变

化,而水位的高频部分变化是由气压和固体潮引起时,应采用高频项来进行回归分析法求气压系数。水位、气压作 0 阶、1 阶、2 阶、3 阶、……、 $n$  阶差分一元回归分析<sup>[21]</sup>,从中选取相关系数最大值的  $B_p$  作为要求的气压系数。使用水位气压校正公式

$$y_i = y_t - B_p (P_t - P_c) \quad (2)$$

式中: $y_t$  为水位日值或小时值,单位为 m; $P_t$  为气压日值或小时值,单位为 hPa; $B_p$  为井的气压系数,单位为 m/hPa; $P_c$  为气压基值常数,选择为 1 000 hPa。计算结果列于表 3。承压井水位变化与气压呈负相关,从分钟值采样率计算数据显示,庄市井气压与水位相关性明显大于北仑、慈溪井,这可能是由于庄市井为盆地更深层的白垩纪基岩构造裂隙水层,与北仑、慈溪井含水层不同。

表 3 3 孔井水位的气压系数(单位:m/hPa)

Table 3 Barometric coefficient of water level of three wells (Unit:m/hPa)

井台名称	庄市井	北仑井	慈溪井
气压系数	0.004 05	0.000 26	0.000 09

### 2.3.2 降雨荷载效应

2019 年 9 月 1—7 日宁波盆地有持续降雨过程,8—20 日天气放晴,21 日 3 时 21 分起该区域又开始降雨,24 小时内雨量达到 67 mm,22 日 17 时 31 分雨止转晴,累计降雨 73.5 mm,为暴雨级。从北仑井、庄市井、宁波站三处降雨量记录分析在宁波盆地范围内降雨时间与降水量差异性不大。21 日暴雨事件对北仑井、慈溪井和庄市井 3 口井均造成了水位上升,而影响水位上升的主要因素包括地表水渗透补给和地表荷载等。由于 3 孔井观测的第 II 含水层无明显的现代水补给,加上在成井时均使用了套管封井,大大减少了含水层与地表水之间的直接水力联系。因此本文假设 3 口井的水位上升是由于降雨形成了地表荷载,通过力的传递,影响到含水层,致使含水孔隙水压加大,引起井水位相应地上升,井孔水位上升是降雨荷载效应作用的结果<sup>[22]</sup>。为分析 3 孔井 21—23 日地表降雨荷载对地下水变化的影响,计算没有降雨时段的固体潮和气压系数,以及气压为 1 000 mbar,固体潮为 0  $\mu\text{gal}$  的水位基值。假设降雨前某小时水位的实测值为  $Y_1$ ,相应的气压、固体潮为  $Q_1$  和  $G_1$ ,则气压 1 000 mbar,固体潮为 0  $\mu\text{gal}$  的水位基值为

$$Y_0 = Y_1 - B_Q \times Q_1 - B_G \times G_1 \quad (3)$$

式中: $B_Q$  为气压系数(由水位埋深求得的  $B_Q$  为正值); $B_G$  为固体潮系数(为负值)。

水位的预测值  $Y(t)$  和  $W_2(t)$  分别为

$$Y(t) = Y_0 + B_Q \times Q(t) + B_G \times G(t) \quad (4)$$

$$W_2(t) = W(t) - Y(t) \quad (5)$$

式中: $Q(t)$ 、 $G(t)$  分别为  $t$  时刻的气压、固体潮值; $W(t)$  为实测水位; $W_2(t)$  为受降雨附加应力影响产生的水位变化。

通过对实测水位与预测水位的差  $W_2(t)$  与降雨量的相关分析,得到相关系数  $R$  和系数  $B$ ,其中  $B$  表示当降雨量为 1 mm 时相应水位上升的米数,通过分钟采样率计算结果列于表 4。

表 4 3 孔井水位的降雨载荷系数

Table 4 Rainfall load coefficient of water level of three wells

井台名称	庄市井	北仑井	慈溪井
水位基值	2.633	6.425	12.406
载荷系数 $R$	0.014 8	0.012 9	0.007 7
载荷系数 $B$	0.000 5	0.000 8	0.000 2

结果表明,庄市井和北仑井的降雨载荷系数数值比较接近,即这 2 口井的载荷作用相近。慈溪井的降雨载荷系数较小,小于庄市井和北仑井,这可能与慈溪井位于 1960 年代围海造田的滩涂地有关。事实上,表 4 的结果很好地反映了载荷系数承压是不同地质覆盖层介质差异性的表现<sup>[23]</sup>

### 2.3.3 潮汐因子与相位差

固体潮的力源主要来自月亮、太阳等天体的引潮力,是能够预先准确计算出理论值的地球物理现象。一个好的承压井的地下水位的变化能够反映出地球潮汐应变的变化。因此,可以用体应变固体潮的理论值来模拟地下水位的变化,对地下水位进行拟合检验,纠正观测中可能存在的错误,检查、衡量和评价固体潮观测资料的质量,提取固体潮和地震前兆的特征信息。

水位的固体潮改正采用小时值 Venedikov 调和分析法,分析固体潮中占主要成分的主太阴半日波  $M_2$  和主太阴日波  $O_1$  波<sup>[24]</sup>。以固体潮体应变作为基准值,对水位小时值观测序列进行固体潮日波、半日波分析,计算水位固体潮系数  $B_\theta$  与相位差  $\Delta\varphi$ 。

$$B_\theta = \frac{B_\theta(M_2)h(M_2) + B_\theta(O_1)h(O_1)}{h(M_2) + h(O_1)} \quad (6)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta\varphi(M_2)h(M_2) + \Delta\varphi(O_1)h(O_1)}{h(M_2) + h(O_1)}$$

式中: $h(M_2)$  为  $M_2$  波的理论振幅; $h(O_1)$  为  $O_1$  波理论振幅。水位固体潮系数的单位为  $\text{mm}/10^{-8}$ ,相位差的单位为度。水位固体潮校正公式:

$$H_i = H_t - B_\theta \Theta(t - \Delta t_\theta) \quad (7)$$

式中: $H_t$  为水位小时值序列; $B_\theta$  为固体潮系数;

$\Theta(t - \Delta t_\theta)$  为较正点提前  $\Delta t_\theta$  的体应变固体潮。潮汐因子和潮汐相位差通过分钟值采样率计算结果列于表 5。结果显示,庄市井潮汐因子大于  $0.5 \text{ mm}/10^{-9}$ , 优于北仑井和慈溪井,总体上 3 孔井在我国地震井水位观测网监测效能评估统计中,水位记录固体潮观测精度属中上水平的井孔<sup>[25]</sup>。

三孔井的潮汐变化存在相位差。庄市井首先出现峰值和谷值,约在 0.2 h、1.0 h 后北仑井、慈溪井分别出现峰值和谷值。3 孔井的潮汐变化从时间轴上庄市井相位与北仑教堂井相近,早于慈溪井。

表 5 3 孔井水位的潮汐因子及潮汐因子误差与相位差

Table 5 Tidal factor of water level of three wells and its error and phase difference

井台名称	庄市井	北仑井	慈溪井
潮汐因子/( $\text{mm}/10^{-9}$ )	0.570	0.163	0.235
潮汐因子误差	0.013	0.021	0.031
潮汐相位差(滞后)/(°)	0	3	15

### 3 结论与讨论

从宁波水文地质监测井网中遴选了北仑井和慈溪井进行水位和水温试验观测,分析计算了水位的气压效率、降雨载荷效应和潮汐因子,并与同处于宁波盆地的映震效果较好的庄市井的相应参数进行了对比,总结如下:

(1) 北仑井、慈溪井和庄市井均为承压水井,静水位观测曲线均能记录到清晰的固体潮,且水位变化趋势具有很好的一致性,特别在试验期间同步观测到了 2 次降雨干扰,反映了 3 口水井的水位变化在时间上和空间上均有很好的相关性,也反映了 3 口水井水位异常动态与其影响因素之间存在很好的成因上的关联,这为地下水干扰识别打下了很好的资料基础。

(2) 庄市井的潮汐因子、气压系数和荷载系数等 3 个参数在 3 孔井中都是最大的,说明庄市井记录固体潮的灵敏度最高,受气压和降雨荷载的影响最大,这可能是因为庄市井观测的是白垩纪基岩裂隙承压水,而北仑井和慈溪井观测的是宁波盆地上更新统海侵时封闭含水层的 II 含水层。

(3) 慈溪井的降雨载荷系数比庄市井和北仑井的大约小一个量级,气压系数则比庄市井的小 2 个量级,半日波潮汐相位差最大,说明该井水位受气压和荷载的影响最小,对外因的响应也最慢。这可能与该井底部为灰褐色黏土,其弹性变形能力不如庄市井的白垩纪基岩、北仑井的全风化凝灰质熔岩那么强有关。

井孔的潮汐因子、气压系数和荷载系数很好地反映了地下水类型、井孔岩性等,这 3 个参数为以后从井网中进一步遴选地震观测井提供了科学依据。宁波地质环境监测水井网 161 口水井均位于含有多个含水层的宁波盆地,井网为在同一构造中开展不同含水层(组)观测和基础研究提供了可能,为建立地下水干扰剔除理论模型、研发地震前兆异常识别技术、开展区域构造运动研究等提供了很好的条件。宁波水文地质监测井网由宁波市自然资源和规划局建设,井孔资料齐全,监测的含水层组别或层位非常清楚。对北仑井、慈溪井开展的地震流体试验性观测表明,可以从水井网中遴选出合格的地震前兆监测井,在该地区建设地震地下流体台阵是完全可行的。

### 参考文献(References)

- [1] GIGGENBACH W F. The composition of gases in geothermal and volcanic systems as a function of tectonic setting[C]// KHARAKA Y K, Eds. Proc. Seventh Internat. Symp. Water-Rock Interaction. A A Balkema, Rotterdam, 1992; 873-878.
- [2] CIOTOLI G, GUERRA M, LOMBARDI S, et al. Soil gas survey for tracing seismogenic faults: a case-study in the Fucino Basin (Central Italy) [J]. J Geophy Res, 1998, 103: 23781-23794.
- [3] BEYERLE, PURTSCHERT, AESCHBACH-Hertig, et al. Climate and groundwater recharge during the last glaciation in an ice-covered region[J]. Science, 1998, 282(5389): 731-734.
- [4] 刘耀炜, 陈华静, 车用太. 我国地震地下流体观测研究 40 年发展与展望[J]. 国际地震动态, 2006(7): 3-12.  
LIU Yaowei, CHEN Huajing, CHE Yongtai. Retrospect and prospect of observation and study on seismic underground fluid in China[J]. Recent Developments in World Seismology, 2006 (7): 3-12.
- [5] ŠÍLENY J, JECHUMTÁLOVÁ Z, DORBATH C. Small scale earthquake mechanisms induced by fluid injection at the enhanced geothermal system reservoir soultz (Alsace) in 2003 using alternative source models[J]. Pure and Applied Geophysics, 2014, 171(10): 2783-2804.
- [6] 曹新来, 薛经, 王贺生, 等. 地下水动态趋势和短临异常[J]. 地震, 2002, 22(1): 97-103.  
CAO Xinlai, XUE Jing, WANG Hesheng, et al. Dynamic tendency of underground water level and its imminent anomalies [J]. Earthquake, 2002, 22(1): 97-103.
- [7] 陆明勇, 牛安福, 鲁德顺, 等. 地壳形变与地下水动态异常特征研究进展[J]. 西北地震学报, 2005, 27(1): 89-95.  
LU Mingyong, NIU Anfu, LU Deshun, et al. The progress of research on anomalous characteristics of crustal deformation and under-ground water behavior[J]. Northwestern Seismological Journal, 2005, 27(1): 89-95.
- [8] 车用太, 鱼金子, 刘成龙, 等. 判别地下水异常的干扰性与前兆

- 性的原则及其应用实例[J].地震学报,2011,33(6):800-808.
- CHE Yongtai, YU Jinzi, LIU Chenglong, et al. Principles on distinguishing interference from seismic precursor of underground water variation and its application[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011, 33(6): 800-808.
- [9] 王广才, 车用太, 刘成龙, 等. 我国地震地下流体观测的现状和趋势[J]. 水文地质工程地质, 2003(6): 89-96.
- WANG Guangcai, CHE Yongtai, LIU Chenglong, et al. Subsurface fluids observation for earthquake study and prediction in China[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2003(6): 89-96.
- [10] 刘耀炜. 面向 21 世纪的地震地下流体科学问题与发展[J]. 国际地震动态, 2005(5): 145-150.
- LIU Yaowei. Prospects evolution of science on seismological underground fluid in the 21st century[J]. Recent Developments in World Seismology, 2005(5): 145-150.
- [11] 车用太, 鱼金子, 王广才. 关于前兆台阵的概念及地下流体前兆台阵建设的方案讨论[J]. 国际地震动态, 2002(9): 1-5.
- CHE Yongtai, YU Jinzi, WANG Guangcai. On concept of precursor array and discussion on construction plan for precursor array of subsurface fluid[J]. Recent Developments in World Seismology, 2002(9): 1-5.
- [12] 车用太, 鱼金子. 我国地震地下流体观测台网调整与优化方案探讨[J]. 地震学报, 2015, 37(2): 357-367.
- CHE Yongtai, YU Jinzi. A discussion about the adjustment and optimization of subsurface fluid monitoring network in China[J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(2): 357-367.
- [13] 叶俊能, 郑铣鑫, 侯艳声. 宁波轨道交通规划区域地面沉降特征分析及监测[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 107-111.
- YE Junneng, ZHENG Xixin, HOU Yansheng. Characteristic analysis of land subsidence and monitoring in the planning area of the Ningbo rail traffic[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(3): 107-111.
- [14] 王怀颖, 袁志梅. 宁波盆地地下水地球化学研究[J]. 地质论评, 1990(5): 414-422.
- WANG Huaiying, YUAN Zhimei. A geochemical study of groundwater in the Ningbo basin[J]. Geological Review, 1990(5): 414-422.
- [15] 李慧峰, 袁宝珠, 张蓓蕾, 等. 探讨利用水文地质监测井网开展地震流体监测的前景: 以宁波市为例[J]. 国际地震动态, 2019(7): 23-27.
- LI Huifeng, YUAN Baozhu, ZHANG Beilei, et al. Exploring the prospects of using hydrogeological monitoring well network to carry out seismic fluid monitoring—taking Ningbo City as an example[J]. Recent Developments in World Seismology, 2019(7): 23-27.
- [16] 姚立珣, 虞雪君, 张士印, 等. 1998 年嵊州 4.0 级地震及其前兆特征[J]. 地震, 1999, 19(4): 365-371.
- YAO Lixun, YU Xuejun, ZHANG Shiyin, et al. Shengzhou Ms4.0 earthquake (Aug. 17, 1998) and its precursory features [J]. Earthquake, 1999, 19(4): 365-371.
- [17] 张仕印, 李于民, 李博惠. 宁波庄市井水位异常变化的地震前兆信息分析[J]. 西北地震学报, 1999, 21(4): 407-410.
- ZHANG Shiyin, LI Yumin, LI Bohui. Analysis on the precursory anomaly variation of well water level at Zhuangshi, Ningbo before earthquakes[J]. Northwestern Seismological Journal, 1999, 21(4): 407-410.
- [18] 李慧峰, 袁宝珠, 高绪兵. 从二次水位仪安装后水温记录差异研判宁波观测井的变化[J]. 高原地震, 2017, 29(4): 60-65.
- LI Huifeng, YUAN Baozhu, GAO Xubing. Study on the variation of Ningbo observation well by the differences of water temperature data recorded after installation of the secondary water level instrument [J]. Plateau Earthquake Research, 2017, 29(4): 60-65.
- [19] 李慧峰, 袁宝珠, 吕奥博. 宁波地震台 2 套水温仪同层观测互干扰现象[J]. 地震地磁观测与研究, 2016(6): 102-105.
- LI Huifeng, YUAN Baozhu, LÜ Aobo. Mutual interference between two sets of water thermometers in same layer observation [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2016(6): 102-105.
- [20] 黄仲, 张卫华, 王慧, 等. 井水位气压效应特征差异研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(增刊 1): 84-86.
- HUANG Zhong, ZHANG Weihua, WANG Hui, et al. Research on characteristics and difference of barometric pressure effect on well water level [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(Suppl01): 84-86.
- [21] 张昭栋. 高阶差分法求深井水位的气压系数[J]. 地震学刊, 1986, 6(2): 74-78.
- [22] 张凤楼, 李翠萍, 刘国明. 大暴雨引起深、浅井水位的异常变化[J]. 地震, 2001, 21(3): 105-108.
- ZHANG Fenglou, LI Cuiping, LIU Guoming. Study on the anomalous variation of deep and shallow wells water level [J]. Earthquake, 2001, 21(3): 105-108.
- [23] 杨从杰, 冯志生, 范小平. 苏 05 井数字化水位雨荷效应的处理与改正[J]. 华南地震, 2004, 24(3): 18-24.
- YANG Congjie, FENG Zhisheng, FAN Xiaoping. Correction and processing for the rainfall load effect of Su No. 05 well digital water level [J]. South China Journal of Seismology, 2004, 24(3): 18-24.
- [24] 刘序俨, 郑小菁, 王林, 等. 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, 2009, 52(12): 3147-3157.
- LIU Xuyan, ZHENG Xiaojing, WANG Lin, et al. Response analysis of the well-water-level system in confined aquifer [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(12): 3147-3157.
- [25] 刘春国, 孔令昌, 杨竹转, 等. 我国地震井水位观测网监测效能评估[J]. 中国地震, 2015, 31(2): 329-337.
- LIU Chunguo, KONG Lingchang, YANG Zhuzhuan, et al. Monitoring efficiency evaluation of well-water-level observation network in China [J]. Earthquake Research in China, 2015, 31(2): 329-337.