

丁风和, 车用太, 刘耀炜, 等. 2022. 地震观测井地下水埋藏类型判定方法及依据[J]. 地震研究, 45(2): 284–289, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0023.

Ding F H, Che Y T, Liu Y W, et al. 2022. The method and basis of judging the groundwater type of the seismic observational well[J]. Journal of Seismological Research, 45(2): 284–289, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0023.

# 地震观测井地下水埋藏类型判定方法及依据\*

丁风和<sup>1</sup>, 车用太<sup>2</sup>, 刘耀炜<sup>3</sup>, 贺嘉伟<sup>1</sup>

(1. 宁夏回族自治区地震局, 宁夏 银川 750001; 2. 中国地震局地质研究所, 北京 100029;  
3. 应急管理部国家自然灾害防治研究院, 北京 100085)

**摘要:** 基于井水位微动态数据及井水化学特性分析, 参考井水位对气压的阶跃响应函数方法、频谱分析方法、潮汐波群相位超前或滞后方法、水-岩平衡状态分析方法, 提出了地震观测井地下水埋藏类型判定方法及综合判定依据, 并将其应用于川滇地区地下水埋藏类型的综合判定。结果表明: 根据本文判定方法得出的地震观测井的地下水埋藏类型, 与依据成井时的贮存埋藏条件判别得到的观测井的地下水埋藏类型有很多不一致, 并对此进行了讨论。

**关键词:** 地震观测井; 井-含水层系统; 地下水埋藏类型

**中图分类号:** P315.723      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-0666(2022)02-0284-06

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0023

## 0 引言

在地壳动力作用信息(又称为地下水微动态)的观测与研究中, 观测井地下水的承压性是至关重要的条件, 因此观测井建设的相关规范与标准都明确要求地震地下水观测井必须是承压井。然而, 由于我国地震地下水观测井多为由地质、石油、水利、矿产等行业提供的勘探井经筛选而成, 且在成井时也仅是定性的从地下水种类、成因、补给区与分布区的关系和动态特征等方面进行区分, 观测井地下水类型主要有潜水、承压水以及二者的混合型(混合水或半承压水); 另一方面, 由于这些井已有四五十年历史, 井孔条件发生了很大变化, 如井孔坍塌、井管变形与破裂、滤水管渗水孔被堵塞、井底泥沙沉积等, 井孔原始的承压性已经改变, 这种状况不仅影响了井水位对地壳动力作用的响应能力, 还严重影响观测数据分析与微动态特征的识别, 特别是地震前兆信

息的识别与提取, 因此, 对观测井地下水埋藏类型的研究与评价迫在眉睫。

对于严格按照相关规范与标准新建的观测井, 其地下水承压性的判定与研究在钻井施工时即可进行, 在成井报告中也会给出明确的说明, 但对于观测了几十年的观测井而言, 这就成了值得研究的问题。本文提出了基于井水位微动态数据分析及井水化学特性分析来判定观测井现今承压性的4种方法, 详述其判定原理与具体操作过程, 以期对地下水观测井映震能力的评估、观测井质量的评价与观测条件的改造与改善、提升地震地下水监测的有效性和科学性、认识和理解地下水运移和动态变化提供一定地理论基础和技术支撑。

## 1 地下水埋藏类型综合评价过程

进行地下水埋藏类型综合评价主要通过以下步骤完成(图1): ①采集观测井至少48 h的水位、整理气压和理论固体潮的整点值数据。②利

\* 收稿日期: 2021-11-05.

基金项目: 地震科技星火计划项目(XH19048)、宁夏自然科学基金项目(2020AAC03438)和地下流体监测与应用研究创新团队(CX2019-2)联合资助。

第一作者简介: 丁风和(1977-), 高级工程师, 主要从事地震地下流体研究. E-mail: dingfenghe@126.com.

用卷积回归法中水位对气压的滞后时间与阶跃响应函数的关系式分析观测井的地下水埋藏类型。③将水位整点值数据进行傅立叶变换得到水位的频谱分析结果，利用各潮汐波主要分量的频率特性分析观测井的地下水埋藏类型。④利用维尼迪柯夫调和分析方法得到相位滞后参数，利用潮汐波群相位超前或滞后方法分析观测井的地下水埋藏类型。⑤采集观测井的水样 ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ )，进行水化学成分分析，通过 Na-K-Mg 三角图，依据未成熟水、部分平衡水或完全平衡水 3 种类型，分析待测观测井的水-岩平衡状态。

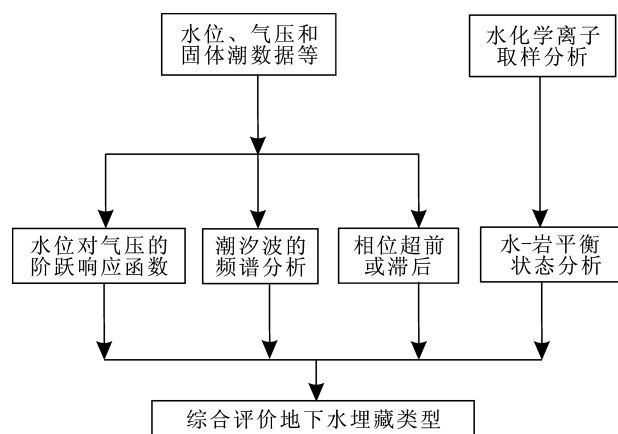


图1 地下水埋藏类型综合评价示意图

Fig. 1 Comprehensive evaluation of the type of the embedded groundwater

## 2 资料处理

将观测井的水位和气压数据整理成数据文本文件，按年逐月检查、整理，要求每天必须有 24 个数据，缺数的地方按照要求用“99999”进行标记，并改变为统一格式备用。水位单位为 m，气压单位为 hPa。

结合 3 次样条插值和一般多项式分段拟合值对数据进行替换。并对数据进行粗差检查，目的是检查整个数据段内的基线值是否统一，数据是否有明显的错误甚至非法。

准备一个各井点的 excel 文件，包括：日期、水位、气压和理论固体潮，且是等间隔的整点值。水位须由埋深值换算成水头高度值，单位为 m；气压单位为 hPa；理论固体潮单位为  $\text{nm/s}^2$ 。

## 3 判定原理与方法

### 3.1 卷积回归法

Rasmussen 和 Crawford (1997) 提出了利用井水位对气压的阶跃响应函数进行地下水类型的定量诊断方法，国内外学者利用该方法开展了相关研究 (Toll, Rasmussen, 2007; Darner, Sheets, 2012; 王丽亚等, 2012; 杨柳等, 2014; 丁风和等, 2017; Shih, 2018)。利用井水位、气压和理论固体潮数据，通过卷积回归方法来拟合各井阶跃响应函数的最佳值，并根据井水位对气压的滞后时间与阶跃响应函数间的关系，来判断井含水层系统的地下水类型，即判断其是承压水还是非承压或半承压水 (图 2)。

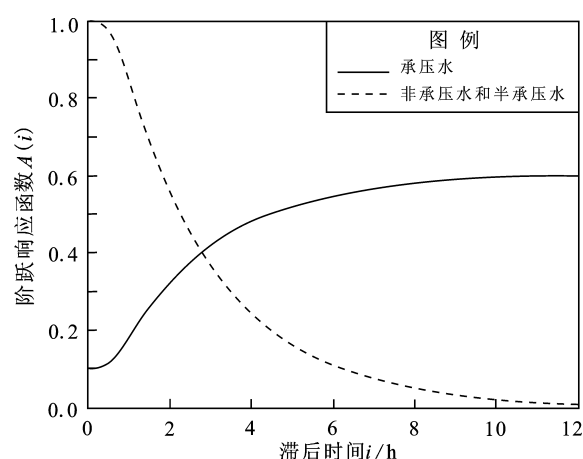


图2 阶跃响应函数与滞后时间的关系  
(据 Camp 和 Paul, 2005)

Fig. 2 Relationship between the step response function and the lag time (based on Camp and Paul, 2005)

若不考虑其它因素，如补给和排泄等，井水位的变化量可表示为：

$$\Delta W(t) = \sum_{i=0}^m \alpha(i) \Delta B(t-i) + \sum_{i=0}^m \beta(i) \Delta ET(t-i) \quad (1)$$

式中： $i$  为滞后时间； $m$  是选择的最大滞后时间； $\Delta W(t)$  为  $t$  时刻的水位变化量； $\alpha(i)$  为滞后  $i$  时刻的气压单位脉冲响应函数； $\Delta B(t-i)$  为  $(t-i)$  时刻的气压变化量； $\beta(i)$  为固体潮响应系数； $\Delta ET(t-i)$  为  $(t-i)$  时刻的固体潮变化量。

井水位对气压的阶跃响应函数可表示为:

$$A(i) = \sum_{j=1}^i \alpha(j) \quad (2)$$

式中:  $A(i)$  为井水位对气压的阶跃响应函数, 可由气压单位脉冲响应函数  $\alpha(i)$  累加求和得到。

结合式 (1)、(2), 建立水位对气压的滞后时间的阶跃响应函数关系式:

$$A(i) = ae^{bi} + c \quad (3)$$

式中:  $A(i)$  为井水位对气压的阶跃响应函数, 值为  $0 \sim 1$ ;  $i$  (定义域) 代表滞后时间, 值为  $0 \sim 12$  h。系数  $a$  的正负决定着井-含水层系统的地下水类型。当  $a < 0$  时, 水位对气压的阶跃响应函数随着水位对气压的滞后时间的增大而增大, 井-含水层系统的地下水类型为承压水; 当  $a > 0$  时, 水位对气压的阶跃响应函数随着水位对气压的滞后时间的增大而减小, 井-含水层系统地下水类型为非承压水或半承压水。定义域  $i$  之前的系数  $b < 0$ ,  $b$  的大小与井孔的形状、尺寸 (结构) 和含水层的水力特性有关。

### 3.2 频谱分析法

从时间域上考虑信号出现的时间和强度, 并不能将信号和干扰区分开, 但是在频率域上考虑信号和干扰所占有的频带, 就很容易区分。将观测到的时间序列信号, 用傅立叶分析方法分解成为许多不同频率的分量, 这就是频谱分析要解决的问题。

函数  $F(x)$  在区间  $[0, 2\pi]$  上的傅立叶级数为:

$$F(x) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{p=1}^{\infty} (a_p \cos px + b_p \sin px) \quad (4)$$

取其前  $(2n+1)$  项, 则有近似方程组:

$$f(x_i) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{p=1}^n (a_p \cos \frac{2\pi ip}{2n} + b_p \sin \frac{2\pi ip}{2n}) \quad (i = 0, 1, \dots, 2n) \quad (5)$$

式中:  $a_0$ 、 $a_p$ 、 $b_p$  ( $p = 1, 2, \dots, n$ ) 是此方程组的解。 $a_p = H_p \cos \varphi_p$ ,  $b_p = -H_p \sin \varphi_p$ , 由此可求得各周期波的振幅  $H_p$  以及初始相位  $\varphi_p$ :

$$H_p = \sqrt{a_p^2 + b_p^2} \quad (6)$$

$$\varphi_p = \arctg(-\frac{b_p}{a_p}) \quad (7)$$

式中: 周期  $T_p = \frac{2n}{p}$ , 单位为样本取样间隔单位。

样本取样间隔单位是指若样本为时值时, 则单位为 h; 若样本为日值时, 则单位为 d; 振幅  $H_p$  单位为输入样本的单位, 如输入样本为水位, 单位为 mm, 则振幅  $H_p$  的单位也为 mm; 初相位  $\varphi_p$  单位为  $^\circ$ 。

因此, 对具有各种周期成分的某一样本序列作傅立叶谱分析, 就是由各波振幅的大小分析此样本序列的主要周期成分, 基于此, 进一步从机理上分析研究该样本序列的特征。

地球固体潮是很多潮汐分波的总和, 但主要成分是 5 个日波 ( $O_1$ 、 $K_1$ 、 $P_1$ 、 $Q_1$ 、 $J_1$ ) 和 5 个半日波 ( $M_2$ 、 $N_2$ 、 $L_2$ 、 $S_2$ 、 $K_2$ )。由固体潮引起的井水位潮汐现象也具有相同的分波, 但在这 5 个日波和 5 个半日波中, 占全部起潮力 95% 以上的主要是  $M_2$ 、 $O_1$ 、 $K_1$ 、 $S_2$  和  $N_2$  波。因此, 通过选取观测井数字化水位和气压整点值数据, 利用地下水类型和潮汐波预期响应存在的对应关系 (表 1), 就可判断观测井含水层的地下水埋藏类型: ①对于承压水, 占全部起潮力 95% 以上的 5 个分波的振幅都比较明显, 其中  $M_2$  波振幅最显著。②对于半承压水,  $M_2$ 、 $K_1$  和  $S_2$  波振幅较为明显, 且  $S_2$  波振幅最显著;  $O_1$  和  $N_2$  波振幅在频率域中可能显现也可能没有。③对于非承压水,  $M_2$ 、 $O_1$  和  $N_2$  波在整个频率域中不会显现;  $K_1$  和  $S_2$  波可能显现也可能没有。

表 1 含水层埋藏类型和潮汐波预期响应的

对应关系 (据 Rahi 和 Halihan, 2013)

Tab. 1 Types of aquifers and the expected response to various tides (based on Rahi and Halihan, 2013)

序号	潮汐波分量	地下水类型和潮汐波预期响应		
		承压水	半承压水	非承压水
1	$O_1$	有	可能有	没有
2	$K_1$	有	有	可能有
3	$M_2$	有, 且显著	有	没有
4	$S_2$	有	有, 且显著	可能有
5	$N_2$	有	可能有	没有

### 3.3 相位超前或滞后法

保加利亚学者维尼迪柯夫提出了一种采用数字频率滤波器对观测数据进行滤波的方法,以取得日波或半日波中的波群观测振幅与理论振幅之比(振幅比或潮汐因子)以及观测相位与理论相位之差(相位超前或滞后)。在对井水位固体潮的分析研究中,通常利用维尼迪柯夫设计的偶数字滤波器和奇数字滤波器进行连续48 h的固体潮观测,取整点值经过数学变换后,可按最小二乘法原理求得各波群的潮汐因子、相位滞后、残差矢量等参数,提取所需的日波、半日波的固体潮信息。

根据水平流模型和垂直流模型下,井水位观测相位变化的范围不同(Xue *et al.*, 2016),也即相位为正(超前,垂直流)或相位为负(滞后,水平流),来判断各井地下水埋藏类型是承压水还是非承压水(Roeloffs, 1996; Shi, Wang, 2016)。

### 3.4 水-岩平衡状态(Piper 三角图)法

在地下水循环过程中,水化学成分可以有效地揭示流域内地表水和地下水之间的转化关系。Na-K-Mg 三角图常用来评价水-岩平衡状态和区分不同类型的水样,能很好地区分混合水和平衡水,样品落在不同的范围内,其意义也不一样。若落在“未成熟水”范围内,表明其为浅层的地下水,主要接受大气降水的补给,循环周期相对较快,水-岩之间尚未达到离子平衡状态,水-岩作用仍在进行。若落在“部分平衡水”范围内,表明其补给来源中除了大气降水外,还有较深层地下水的混入,水-岩反应相对较弱,水流系统相对较为稳定,不易受到干扰。若落在“完全平衡水”范围内,说明水-岩反应较为充分,补给来源主要来自于深层地下水,大气降水补给少。

## 4 地下水埋藏类型综合判定依据

井水位对气压的阶跃响应函数方法能区分2种类型的地下水,即承压水 and 非承压水(或半承压水);频谱分析方法可区分3种类型,即承压水、半承压水 and 非承压水;潮汐波群相位超前或滞后方法也只能区分两种类型,即承压水 and 非承压水或半承压水;水-岩平衡状态分析方法能区分3种类型,即未成熟水、部分平衡水和完全

平衡水。因此,可通过上述4种方法的组合来综合判定观测井的地下水埋藏类型,其依据是:①若使用3种定量方法——井水位对气压的阶跃响应函数、井水位潮汐波的频谱分析、井水位潮汐波群的相位超前或滞后都判定为承压水,且不管水-岩平衡状态方法判定结果如何,则综合判定为承压水。②当使用水-岩平衡状态方法判定为完全平衡水时,直接判定为承压水。③当使用3种定量方法——井水位对气压的阶跃响应函数、井水位潮汐波的频谱分析、井水位潮汐波群的相位超前或滞后,其中有1~2种方法都判定为承压水,且水-岩平衡状态方法判定结果为未成熟水或部分平衡水,则综合判定为混合水。④当使用井水位对气压的阶跃响应函数方法和井水位潮汐波群的相位超前或滞后方法判定为非承压水或半承压水、使用频谱分析方法判定为非承压水,且水-岩平衡状态方法表明是部分平衡水,则该井综合判定为混合水。⑤当使用井水位对气压的阶跃响应函数方法和井水位潮汐波群的相位超前或滞后方法判定为非承压水或半承压水,同时,使用频谱分析方法判定为非承压水,且水-岩平衡状态方法表明是未成熟水,则综合判定为非承压水。

以上可见,除了上述①、②和⑤条外,其余都可将观测井水综合判定为混合水。

## 5 方法应用与讨论

以川滇地区的泸州13井、南溪井、川32井、红河开远井、腾冲井、丽江井、通海高大井、德阳井、姚安井、永胜井、保山井和德宏法帕井等12口井为例,利用上述4种方法对地下水埋藏类型进行了综合判定(表2),结果表明:①通海高大井、永胜井、姚安井基于井水位对气压的阶跃响应函数方法、频谱分析方法、潮汐波群相位超前或滞后方法诊断和判别的地下水埋藏类型都为承压水,且与3口井依据成井时的贮存埋藏条件定性判别的结果(裂隙承压水和孔隙承压水)一致。从水-岩平衡状态来看,虽然3口井都具有承压性,但受控于区域地形地貌、构造特征以及裂隙发育程度等,使得井孔中的地下水与外界有着一定的水力联系,受大气降水的地表径流、侧向径

流和越层补给影响较大。②德阳川 08 井基于 3 种方法虽然没有诊断和判别为承压水,但水-岩平衡状态显示,该井水-岩反应较为充分,补给来源主要为深层地下水。③其余 8 口井不同程度地表现出承压水的特征,但与外界水力联系关系密切,

受大气降水的地表径流、侧向径流和越层补给影响较显著。因此,综合判定通海高大井、永胜井、姚安井和德阳川 08 井为承压水;腾冲井、德宏法帕井、川 32 井、开远井、保山井、丽江井、泸州川 13 井、南溪川 12 井为混合水。

表 2 多方法综合判定川滇地区 12 口井地下水埋藏类型结果

Tab. 2 Results from comprehensive determination of groundwater types of 12 wells in Sichuan-Yunnan region by multiple methods

井点名称	地下水埋藏 类型*	多方法综合判定地下水埋藏类型				
		阶跃响应函数方法	频谱分析方法	潮汐波群相位超前或滞后方法	水－岩平衡状态方法	综合判定结果
腾冲井	裂隙承压水	非承压水或半承压水	半承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
通海高大井	孔隙裂隙承压水	承压水	承压水	承压水	未成熟水	承压水
永胜井	裂隙承压水	承压水	承压水	承压水	未成熟水	承压水
德宏法帕井	承压水	承压水	承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
姚安井	孔隙承压水	承压水	承压水	承压水	未成熟水	承压水
川 32 井	孔隙裂隙混合水	非承压水或半承压水	承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
开远井	裂隙承压水	非承压水或半承压水	半承压水	承压水	未成熟水	混合水
保山井	裂隙承压水	承压水	半承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
丽江井	裂隙承压水	承压水	承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
泸州川 13 井	裂隙承压水	承压水	半承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
南溪川 12 井	裂隙承压水	非承压水或半承压水	半承压水	半承压水或非承压水	未成熟水	混合水
德阳川 08 井	裂隙承压水	非承压水或半承压水	非承压水	半承压水或非承压水	完全平衡水	承压水

注: \* 表示依据成井时的贮存埋藏条件定性判别的地下水埋藏类型。

运用本文提出的多种方法综合判定的地震观测井的地下水埋藏类型,与依据成井时的贮存埋藏条件定性判别的地下水埋藏类型有很多不一致。究其原因:①有些井点虽然在承压区(具有承压性)内,但由于比较靠近补给区或排泄区,受控于区域地形地貌、构造特征以及裂隙发育程度等,使得井孔中的地下水与外界有着一定的水力联系。②有些井点虽然在承压区内,但井管年久失修,存在腐蚀破损现象,地表水和浅层水很容易进入井管内,与外界的水力联系也很密切。③远离补给区或排泄区,且井况良好的井点受地表水和浅层水的干扰较少,水-岩反应相对较弱和充分,补给来源主要为深层地下水,Na-K-Mg 三角图反映的水-岩平衡状态能提供很好的佐证。

## 6 结论

地震观测井水位观测作为地震流体观测最有效的手段之一,过去的几十年里在地震监测预报方面发挥了重要的作用。但受观测环境干扰日益

加剧、井点年久失修等因素的综合影响,其产出资料的质量和信度不尽如人意。本文基于井水位微动态数据及井水化学特性分析,参考井水位对气压的阶跃响应函数方法、频谱分析方法、潮汐波群相位超前或滞后方法、水-岩平衡状态分析方法,提出了地震观测井地下水埋藏类型判定方法及综合判定依据,并以川滇地区的 12 口地震观测井为例,分析了多方法综合判定结果与依据成井时的贮存埋藏条件定性判别的地下水埋藏类型结果之间有很多不一致的原因。

因此,应用本文提出的 4 种方法对地震观测井地下水埋藏类型判定进行研究,是井孔观测质量和可信度评价、水位异常的甄别、观测井(点)的遴选等的一种有效途径。

## 参考文献:

- 丁风和,范雪芳,戴勇,等. 2017. 井-含水层系统地下水类型定量分析和判别[J]. 地震学报,39(1):78-84.
- 王丽亚,郭海朋,李文鹏. 2012. 气压对观测井水位的影响及校正方法[J]. 水文地质工程地质,39(6):29-34.
- 杨柳,马建英,曹井泉,等. 2014. 利用华北地区承压井水位资料反演

- 含水层体应变[J]. 中国地震, 30(2): 249–259.
- Camp M V, Paul V. 2005. Tsoft: Graphical and interactive software for the analysis of time series and earth tides[J]. Computers & Geosciences, 31(5): 631–640.
- Darner R A, Sheets R A. 2012. Using Existing Data to Estimate Aquifer Properties, Great Lakes Region, USA[J]. Groundwater, 50(3): 477–484.
- Rahi K A, Halihan T. 2013. Identifying aquifer type in fractured rock aquifers using Harmonic analysis[J]. Groundwater, 51(1): 76–82.
- Rasmussen T C, Crawford L A. 1997. Identifying and removing barometric pressure effects in confined and unconfined aquifers[J]. Ground Water, 35(3): 502–511.
- Roeloffs E A. 1996. Poroelastic techniques in the study of earthquake related hydrologic phenomena[J]. Adv Geophys, 3(7): 135–195.
- Shi Z, Wang G. 2016. Earthquakes switch aquifers from confined to semi-confined; Earthquake changed aquifer confinement[J]. Geophysical Research Letters, 4(3): 112–120.
- Shih D C F. 2018. Identification of individual efficiency for barometric pressure and ocean tide load simultaneously acted on deep aquifers adjacent to the West Pacific Ocean[J]. Pure and Applied Geophysics, 12(2): 211–223.
- Toll N J, Rasmussen T C. 2007. Removal of barometric pressure effects and earth tides from observed water levels[J]. Ground Water, 45(1): 101–105.
- Xue L, Brodsky E E, Erskine J, *et al.* 2016. A permeability and compliance contrast measured hydrogeologically on the San Andreas Fault[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 17(3): 1–14.

## The Method and Basis of Judging the Groundwater Type of the Seismic Observational Well

DING Fenghe<sup>1</sup>, CHE Yongtai<sup>2</sup>, LIU Yaowei<sup>3</sup>, HE Jiawei<sup>1</sup>

(1. Ningxia Hui Autonomous Region Earthquake Agency, Yinchuan 750001, Ningxia, China)

(2. Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

(3. National Institute of Natural Disaster Prevention and Control, Ministry of Emergency Management, Beijing 100085, China)

### Abstract

On the basis of the micro-dynamic data of the water level and the analysis of hydro-chemical characteristics of the seismic observational well, and referring to the methods like the step response function of water level and air pressure, the spectral analysis, the leading or lagging of the phase of tidal wave group, and the water-rock equilibrium analysis, we propose a method of judging the groundwater type of the seismic observational well, and the synthetic judgment basis. Then we apply our method and judgment basis to judging the groundwater type in Sichuan–Yunnan region. We find that the groundwater types of seismic observational wells got according to our judgment method differ sharply from the ones judged according to the storage conditions at the time when the wells were built. Thus, we further discuss the reason.

**Keywords:** seismic observational wells; well-aquifer system; groundwater type