

刘锦, 陈大庆, 赵微微, 等. 广东信宜井水位受降雨影响的回归分析 [J]. 华南地震, 2020, 40 (2): 73-79. [LIU Jin, CHEN Daqing, ZHAO Weiwei, et al. Regression Analysis of Water Level Affected by Rainfall in Xinyi Well of Guangdong Province [J]. South China journal of seismology, 2020, 40 (2): 73-79]

广东信宜井水位受降雨影响的回归分析

刘 锦¹, 陈大庆¹, 赵微微², 钟天任¹, 杨 雪³

(1. 广东省地震局, 广州 510070; 2. 大庆油田有限责任公司第六采油厂第四油矿地面工程组, 黑龙江 大庆 163114;
3. 中山大学, 广州 510275)

摘要: 前兆水位观测中降雨影响的排除一直是困扰前兆流体观测的一个难题, 在前人研究的基础上根据水位长时间断续升高和短时间单调升高两种情况统计了降雨参数与水位升高幅度的关系, 分别建立了两种情况下降雨影响水位升高幅度的多元回归方程, 从而为信宜井水位数据的日常分析提供了一种基于回归统计的定量排除降雨干扰的方法。回归分析结果显示: 在苍梧地震前从 2015 年开始信宜井水位升高的幅度就偏高, 震后偏低, 这可能和地震前后区域应力场的调整有关。

关键词: 水位观测; 降雨影响; 信宜井; 回归分析

中图分类号: P315.723 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8662 (2020) 02-0073-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2020.02.011

Regression Analysis of Water Level Affected by Rainfall in Xinyi Well of Guangdong Province

LIU Jin¹, CHEN Daqing¹, ZHAO Weiwei², ZHONG Tianren¹, YANG Xue³

(1. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 2. No. 6 Oil Production Plant, Daqing Oil Field Co., Daqing 163114, China; 3. National Sun Yat-sen University, Guangzhou 510070, China)

Abstract: It is a difficult problem to eliminate the influence of rainfall in the observation of precursory water level. On the basis of previous studies, relationship between rainfall and water level under two conditions of long-time and short-time rising of statistical water level is calculated, and multiple regression equations for the influence of rainfall on the water level rise are established respectively, which provides a method for quantitatively eliminating rainfall interference based on regression statistics for daily analysis of Xinyi well water level data.

Regression analysis results show that the water level in Xinyi well increased to a high level from 2015, before the Cangwu earthquake, and was low after the earthquake. This may be related to the adjustment of regional stress field before and after the earthquake.

Keywords: Water level observation; Rainfall influence; Xinyi Well; Regression analysis

收稿日期: 2019-08-15

基金项目: 广东省科技计划项目 (2019B020208014); 中国地震局震情跟踪青年项目 (2018010317) 联合资助

作者简介: 刘锦 (1970-), 女, 高级工程师, 主要从事地震预报研究。

E-mail: 1548173006@qq.com

0 引言

地下水位作为流体学科重要的物理观测量,是一个包含大气降水、气压、固体潮、地应力等多种影响因素的复合参数^[1-2]。前人对降雨、气压、固体潮、地应力等因素对水位影响进行了研究^[3-4],而降雨是地下水位变化的主要影响因素,由于水位受降雨影响的形成机理较为复杂,定量排除降雨干扰是一个难题,一些学者对水位的降雨排除做过一些研究^[5-6],尝试利用地下水位同一年的峰值与谷值之差(即年变化幅度)和降雨量、地下水位谷值变化逐年差值与年降雨量、水位年变化量与雨季降雨量进行一元回归相关分析,得到一些有益结果。本文在前人研究的基础上根据水位长时间断续升高和短时间单调升高两种情况统计了降雨参数与水位升高幅度的关系,分别建立了两种情况下降雨影响水位升高幅度的多元回归方程,从而为信宜井水位数据的日常分析提供了一种基于回归统计的定量排除降雨干扰的方法^[7-8]。

1 信宜井观测条件及区域地质概况

1.1 区域地质背景

信宜观测井位于粤西隆起带,该区地质构造复杂,总体格局为一组北东向的活动断层和一组北西向的活动断层互相切割,形成网格状构造,其中北东向的断层有合浦—玉林—梧州断裂、廉江—信宜断裂、吴川—四会断裂;北西向的断层有横县—博白—茂名断裂、高州—电白断裂、茶山—闸坡断裂。区域内历史上曾发生多次6级以上强震。

1.2 观测条件

观测井孔所采取的基岩主要为花岗片麻岩变质后产生的混合岩,井孔总深101.90 m。以裂隙承压水为主,少量孔隙水。目前有水位、水温等观测项目,及辅助观测的气象三要素。

广东信宜井静水位测项是广东省内唯一观测资料地震预报效能评估A类井,现水位观测

使用LN-3型数字化水位仪观测,就多年观测情况来看,信宜井具有较清晰的年变动态,观测曲线的固体潮效应显著,并且在2008年汶川地震,2011年日本311地震后都出现了显著的震后效应。说明该观测井水位观测对区域应力场的变化反应较为灵敏。降雨是该井水位变化的主要影响因素。

2 回归分析

水位观测受降雨影响的形成机理较为复杂,不仅与降雨的分布、大小、速率等气象因素有关,而且与降雨渗入补给区的地形地貌、植被及包气带的厚度、透水性、含水量等多种区域水文地质因素有关(流体百科)。实际观测中取得上述参数较为困难,特别是区域水文地质因素。本文利用回归分析统计了降雨量、降雨持续时间等气象因素与水位变化的关系,建立了回归方程。但对于区域水文地质因素无法及时取得其数据,且包气带的透水性、含水量可能受到前期降雨的影响而随时间变化,因此文中分两种情况来分析,一种是水位长时间断续升高,另外一种为水位短时间单调升高。前者反映了雨季长时间降雨对水位的影响,后者反映了单次持续降雨对水位的影响^[9-12]。

2.1 水位长时间断续升高期间降雨影响的回归分析

图1中水位观测曲线在雨季大多数出现了断续的升高,表1中选取了2014—2017年7月信宜3号井水位的12次长时间上升区间(部分时段有小幅的回落),选择了升高期间降雨量(降雨量1)、降雨持续时间,最大单日降雨量3个降雨的气象因素,包气带的透水性、含水量等水文地质因素可能和前期的降雨量及水位的高度有关,因此选取升高前期降雨量(降雨量2)、升高阶段最高水位两个因素来替代以上区域水文地质因素,用以上5个自变量对水位升高幅度因变量进行多元回归分析。

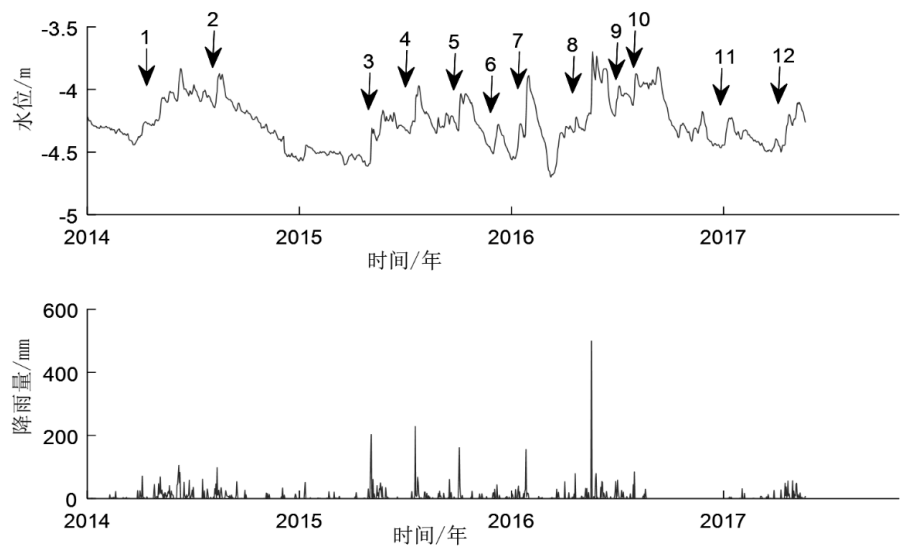


图 1 信宜井水位与日降雨量
Fig.1 Water level and daily rainfall in Xinyi well

表 1 信宜井 2014—2017 年 12 个显著上升期间及水位上升幅度检验
Table 1 12 significant rising periods and water level rise tests in Xinyi well from 2014 to 2017

序号	开始时间 /（年一月一日）	结束时间 /（年一月一日）	水位上升幅度是否满足回归方程的置信区间
1	2014-03-24	2014-06-12	满足
2	2014-08-10	2014-08-15	满足
3	2015-04-30	2015-05-26	满足
4	2015-07-11	2015-07-27	满足
5	2015-10-04	2015-10-09	满足
6	2015-12-02	2015-12-10	满足
7	2016-01-05	2016-02-02	偏高（+0.1776）
8	2016-03-14	2016-05-23	满足
9	2016-06-28	2016-07-06	满足
10	2016-07-29	2016-08-06	满足
11	2016-12-30	2017-01-18	满足
12	2017-03-23	2017-05-13	稍偏低（-0.0382）

由于降雨对水位的影响在时间上有滞后，因此需要考虑对于升高期间降雨量（降雨量 1）和升高前期降雨量（降雨量 2）两个自变量在时间段上的选择，图 2 是计算两个降雨量和水位升高幅度的相关系数，当水位升高期间（降雨量 1）选择上升开始前 2 d 至结束前 2 d 相关系数最大为 0.8279（图 2），开始前 3 d 正相关系数下降的非常快，说明信宜井水位对降雨的滞

后在 2 d。升高前期降雨量（降雨量 2）选择上升开始前 20 d 至开始前 3 d 负相关系数最大为 -0.5412。但从前期降雨开始时间选择从前 26 d 到前 19 d 负相关系数变化不大。因此文中对于升高期间降雨量（降雨量 1）选择为上升开始前 2 d 至结束前 2 d；升高前期降雨量（降雨量 2）选择上升开始前 20 d 至开始前 3 d。

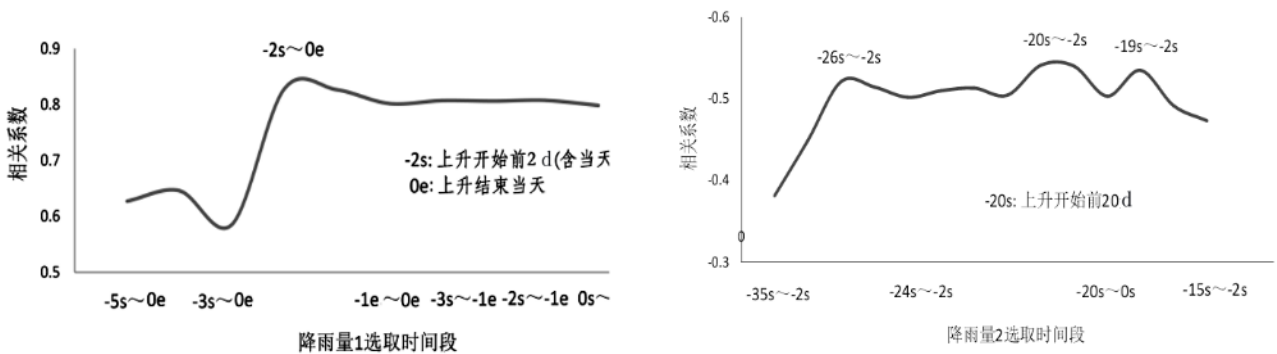


图 2 2 个降雨量不同的选择时间段与水位升高幅度的相关系数
Fig.2 The correlation coefficient between rainfall and the rise of water level at two periods with different rainfall

表 2 为以上 6 个参数之间的相关系数。从中可以看到上升持续时间、升高阶段最高水位、升高期间降雨量（降雨量 1）、最大单日降雨量 4 个参数与水位升高幅度是正相关，其中上升持

续时间、升高期间降雨量（降雨量 1）、最大单日降雨量与水位升高幅度的相关系数几乎达到或者超过了 0.8。而升高前期降雨量（降雨量 2）与水位升高幅度是负相关。

表 2 水位升高幅度与持续时间、升高阶段最高水位、水位升高区间降雨量（降雨量 1）、最大单日降雨量、升高前期降雨量（降雨量 2）的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between the increasing amplitude of water level and the duration, the highest water level in the rising stage, the rainfall in the rising interval (rainfall 1), the maximum daily rainfall and the rainfall in the early rising stage (rainfall 2)

水位升高幅度	持续时间	升高阶段最高水位	降雨量 1	最大单日降雨量	降雨量 2
1	0.7955	0.5869	0.8279	0.7947	-0.5412
0.7955	1	0.4241	0.8941	0.4412	-0.5586
0.5869	0.4241	1	0.4667	0.5404	0.1031
0.8279	0.8941	0.4667	1	0.5987	-0.446
0.7947	0.4412	0.5404	0.5987	1	-0.2959
-0.5412	-0.5586	0.1031	-0.446	-0.2959	1

$y=1.3464+0.002464(x_1)+0.27327x_2+(8.7727e-05)x_3+0.00070842x_4-0.0011766x_5$

其中 y : 水位上高幅度 (m); x_1 : 水位升高持续时间 (d); x_2 : 升高阶段最高水位 (m); x_3 : 上升开始前 2 d 至结束前 2 d 降雨量 1(mm); x_4 : 升高期间最大单日降雨量 (mm); x_5 : 上升开始前 20 天至开始前 3 d 降雨量 2(mm)。

对回归方程进行显著性检验 p 值为 0.00514 小于 0.05，回归方程是显著的。图 3 为这 12 次水位升高的多元线性回归检验，最显著的一次高值异常是 7 号发生在苍梧地震前的 2016 年 1 月 5 日至 2 月 2 日，高值异常回落后约 6 个月发生了苍梧地震（震中距 182 km）。

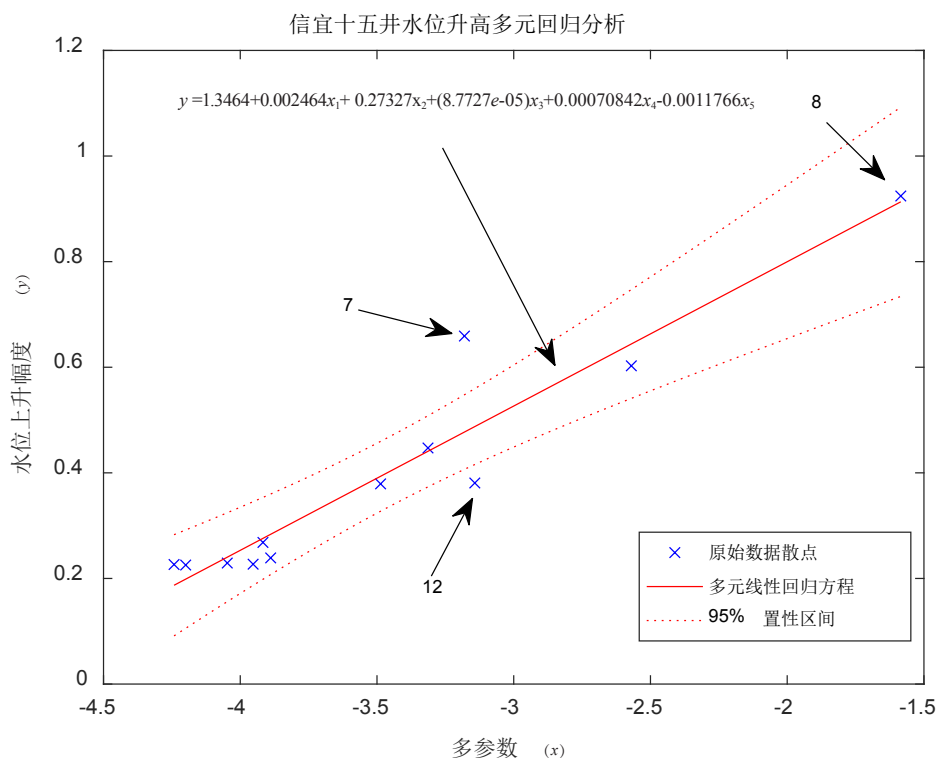


图3 信宜井水位升高幅度与持续时间、升高阶段最高水位、水位升高区间（降雨量1）、最大单日降雨量、升高前期（降雨量2）降雨量的多元回归检验

Fig.3 Multiple regression test on the range and duration of water level rise, the highest water level in the rising stage, the range of water level rise (rainfall 1), the maximum daily rainfall, and the rainfall in the early rising stage (rainfall 2) in Xinyi well

2.2 水位短时间单调升高降雨的回归分析

图4为2014—2017年131次水位连续上升3d（包含3d）以上，水位升高持续时间、水位升高期间降雨量（降雨量1）、最大单日降雨量3个参数和水位升高幅度之间的关系，以上3个参数和水位升高幅度有正相关的关系，相关系数分别为0.78、0.70，和0.68。降雨量1选择水位开始升高前一天到升高结束当天相关系数最

大。由于水位短时间单调升高前期的降雨量（降雨量2）时间上多数会和前一次升高期的降雨量（降雨量1）重合，因此降雨量2对水位升高幅度的负相关系数并不好，另外升高阶段最高水位相关系数也不好，因此在对水位短时间单调升高的回归分析中舍弃了降雨量2和最高水位这两个自变量。

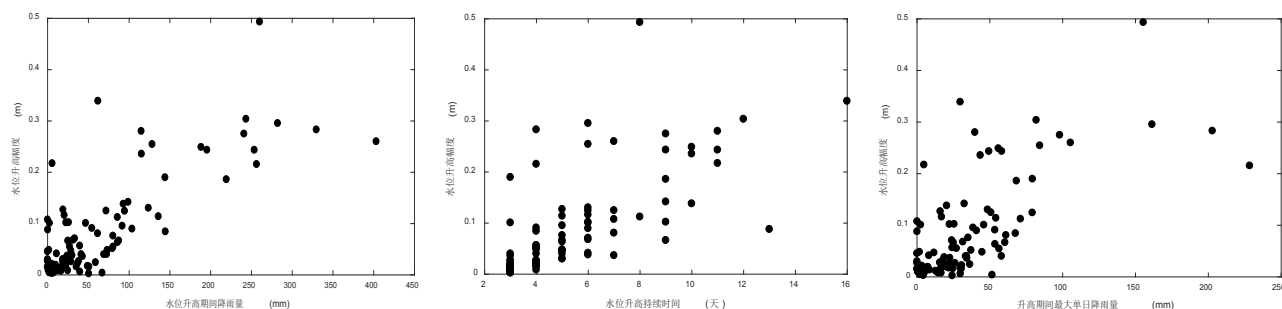


图4 信宜井水位短时单调升高幅度与降雨量、持续时间、最大单日降雨量的关系

Fig.4 Relationship between short-term rise of water level and rainfall, duration and maximum daily rainfall in Xinyi well

表 3 水位短时升高幅度与持续时间、水位升高区间降雨量（降雨量 1）、最大单日降雨量的相关系数
Table 3 The correlation coefficient of short-time rising range and duration, interval rainfall (rainfall 1) and maximum daily rainfall

水位升高幅度 / (m)	持续时间 / (d)	降雨量 1/ (mm)	最大单日降雨量 / (mm)
1	0.7028	0.779	0.6814
0.7028	1	0.3762	0.1883
0.779	0.3762	1	0.8567
0.6814	0.1883	0.8567	1

以上参数建立的多元回归方程为

$y = -0.0066511 + 0.018874x_1 + 0.00036502x_2 + 0.00076246x_3$

- y: 水位升高幅度 (m)
- x₁: 水位升高持续时间 (天)
- x₂: 升高时间段降雨量 (m)
- x₃: 最大单日降雨量 1(mm)

对回归方程进行显著性检验 p 值为 $2.44e-35$ 小于 0.05, 回归方程是显著的。图 5 为时间序列上这 131 次水位上升幅度与根据回归方程拟合的上升幅度, 图 6 为两者的差值, 从中可以看到 2016 年 7 月 31 日苍梧地震前 2015 年开始水位上升的幅度明显偏高, 而震后升高的幅度减小。

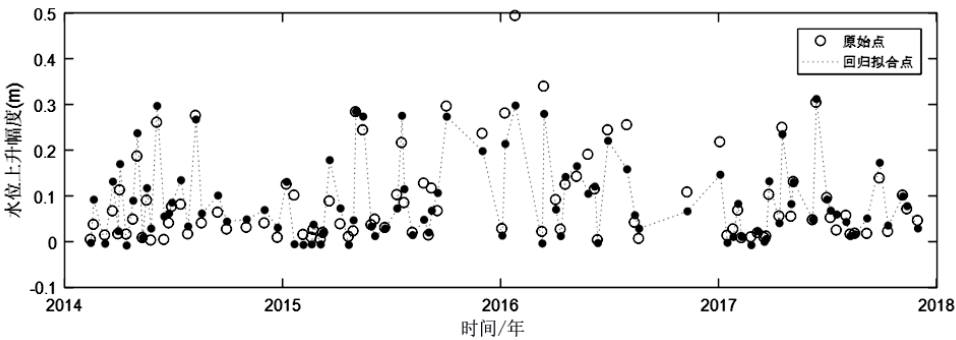


图 5 信宜水位上升幅度与回归拟合得到的上升幅度
Fig.5 The extent of water level rise in Xinyi and its regression fitting

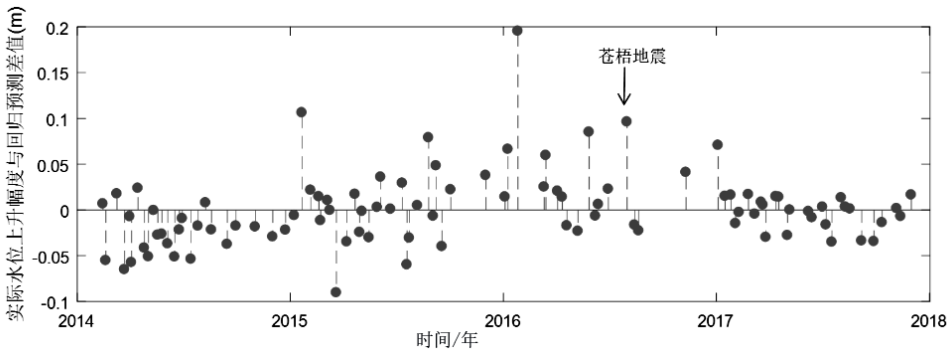


图 6 信宜水位上升幅度与回归拟合上升幅度差值
Fig.6 Difference between water level rise and regression fitting rise in Xinyi

3 结论和讨论

我国的流体前兆观测大多受到降雨影响, 因此在日常分析中如何排除降雨的影响一直是困扰前兆流体观测的一个难题。由于地下水位

变化与降雨量的关系较为复杂, 不仅与降雨的分布、大小、速率等气象因素有关, 而且与降雨渗入补给区的地形地貌、植被及包气带的厚度、透水性、含水量等多种区域水文地质因素有关, 这些因素的获取都较为困难。本文在前

人研究的基础上根据水位长时间断续升高和短时间单调升高两种情况统计了降雨参数与水位升高幅度的关系，分别建立了两种情况下降雨影响水位升高幅度的多元回归方程，从而为信宜井水位数据的日常分析提供了一种基于回归统计的定量排除降雨干扰的方法。

前一种情况水位长时间断续升高反映了雨季长时间降雨对水位的影响，回归分析中选择了高期间降雨量（降雨量1）、降雨持续时间，最大单日降雨量3个降雨的气象因素和升高前期降雨量（降雨量2）、升高阶段最高水位两个和水文地质因素的参量对水位升高幅度因变量进行多元回归分析。而后一种情况水位短时间单调升高反映了单次持续降雨对水位的影响，在回归分析中没有选取升高前期降雨量（降雨量2）、升高阶段最高水位两个参量是由于在时间上多数会和前一次升高期的降雨量（降雨量1）重合，因此降雨量2和最高水位对水位升高幅度的负相关系数不好。

两种回归分析方法都显示了在苍梧地震前从2015年开始信宜井水位升高的幅度就偏高，震后偏低。这可能和地震前后区域应力场的调整有关。

参考文献：

- [1] 广东省地震局. 广东省地震监测志 [M]. 北京：地震出版社，2005.
- [2] 魏柏林，冯绚敏，陈定国，等. 东南沿海地震活动特征 [M]. 北京：地震出版社，2001.
- [3] 中国地震局监测预报司. 地下流体观测技术 [M]. 北京：地震出版社，2010.

- [4] 魏焕，张昭栋，耿杰，等. 井水位气压加卸载响应比 [J]. 西北地震学报，2003，25(1)：82-85.
- [5] 车用太，鱼金子. 地震地下流体学 [M]. 北京：气象出版社，2006.
- [6] 赵栋，易立新，王广才，等. 地下水位中地震前兆信息提取方法研究 [J]. 地震工程学报，2013，35(2)：334-341.
- [7] 毛巍颖，云南思茅大寨井水位地震同震响应特征分析 [J]. 地震研究，2018，42(4)：577-582.
- [8] 胡晓静，付虹，李利波，等. 云南江川渔村井地下补给来源分析 [J]. 地震研究，2018，42(4)：544-550.
- [9] 张昭栋，郑金涵，冯初刚. 井水位的固体潮效应与含水层参数间的定量关系 [J]. 西北地震学报，1989，11(3)：47-52.
- [10] 白宝荣，付虹. 排除降雨干扰后的地下水位异常与强震预报 [J]. 地震研究，2006，29(1)：39-42.
- [11] 胡小静，付虹，毕青. 基于年降水干扰排除的云南地区地下水群体异常研究 [J]. 地震研究，2016，39(4)：545-552.
- [12] 刘俊芳，吕芳，郭宇，等. 山西静乐观测井水位干扰分析 [J]. 地震地磁观测与研究，2016，37(3)：30-35.