

范雪芳, 刘国俊, 王霞, 等. 山西运城东郭井水位异常变化成因研究[J]. 华南地震, 2016, 36(2): 60-69. [FAN Xuefang, LIU Guojun, WANG Xia, et al. Study on Cause of Anomaly Change of Water Level at Dongguo Well in Yuncheng, Shanxi[J]. South china journal of seismology, 2016, 36(2): 60-69.]

山西运城东郭井水位异常变化成因研究

范雪芳^{1, 2}, 刘国俊^{2, 3}, 王霞^{1, 2}, 闫亚荣⁴, 梁建华⁴

(1. 山西省地震局, 太原 030021; 2. 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025;
3. 山西省地震局夏县中心地震台, 山西 夏县 044400; 4. 运城市地震局, 山西 运城 044000)

摘要: 异常核实工作是地震分析预报的基础, 2012年8月2日东郭观测井水位出现加速下降, 按照异常核实工作方案, 从观测技术系统, 井孔周围地下水开采量变化、农田灌溉用水量变化、气象因素及同期对比试验等, 进行调查分析。通过排查分析, 认为此次变化与构造活动有关, 该项工作对异常的判断、核实具有一定的参考价值。

关键词: 东郭井水位; 水位变化; 对比试验; 干扰因素

中图分类号: P315.723

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662 (2016) 02-0060-10

DOI: 10.13512/j.hndz.2016.02.010

Study on Cause of Anomaly Change of Water Level at Dongguo Well in Yuncheng, Shanxi

FAN Xuefang^{1, 2}, LIU Guojun^{2, 3}, WANG Xia^{1, 2}, YAN Yarong⁴, LIANG Jianhua⁴

(1. Earthquake Administration of Shanxi Province, Taiyuan 030021, China; 2. National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030025, China; 3. Xiaxian Central Seismological Station of Earthquake Administration of Shanxi Province, Xiaxian 044400, China; 4. Earthquake Administration of Yuncheng, Yuncheng 044400, China)

Abstract: Anomaly verification is the basis of seismic analysis and prediction. Water level of Dongguo well appears accelerating drop on August 2nd, 2012. According to the working plan of anomaly verification, the author does the investigation from the system of observation technology, variation of produced quantity of underground water around the wellhole, variation of water consumption of irrigation of farmland, meteorological factor, and observation and contrast test of the corresponding period. Through the investigation and analysis, it is considered that the variation is related to tectonic activity and the work has some reference value to judging and checking of anomaly.

Keywords: Water level of Dongguo well; Variation of water level; Contrast test; Inference factor

收稿日期: 2015-06-30

基金项目: 地震行业科研专项“汾渭断陷带中段地震危险性研究”(2014419013)和震情跟踪任务“晋冀蒙交界地区观测与研究”共同资助。

作者简介: 范雪芳 (1963-), 女, 高级工程师, 主要从事地下流体监测预报和研究工作

E-mail: xuefang63@163.com.

0 引言

由于地下水具有普遍性、流动性与难压缩性的特点,当它形成具有一定封闭条件的承压系统时,就能够客观地、灵敏地反映地壳应力应变的状态。地震是地壳运动中岩层互相挤压受力产生的突然破裂。岩层从受力到破裂需要一个长期过程,当岩层所承受的力超过岩层承受力极限时,地壳就会发生变形。在这个过程中,一方面,岩层因破裂发生变化;另一方面,地下水、气体、地球磁场也都发生明显变化,因而地震前地下水对地震很敏感,在较多的大地震前已观测到井水位的变化,如唐山、海城、渤海等地震前出现了井水位降低的现象,孟连地震前距离震中 25 km 的双江井于震前半年多在没有降水的情况下出现趋势上升等,因此地下井水位观测一直被看作是用于地震预测、预报的重要的观测手段之一。但是地下水位的异常变化又不仅仅是地震孕育产生的,即非地震因素可以引起地下水异常变化,如观测系统、观测环境(降水、抽水、注水等)的变化导致水位变化。所以地震前对地下水异常性质进行识别是地震预测工作中首要的任务,是震情监视跟踪工作的基础,也是进行有效地震预测的技术保障。

我国地震地下流体经过 40 多年的发展,已形成了通过观测地下水、地下气和地热的动态获取地震孕育、发生以及成灾过程中地球物理场和地球化学场变化的观测网,建立了一套基于理论指导下的经验性地震预报体系^[1]。关于地下水位异常核实及水位变化与降雨、气压、径流、开采、排泄等的研究,许多学者开展了大量的工作。车用太等^[2-5]提出了评估地下流体观测环境的技术指标—干扰度,进一步规定了水位、水温等观测环境的允许干扰度,并提出了地下水干扰异常识别与排除的 4 个“相关性”原则;黄辅琼等^[6]利用北京丰台大灰厂观测台站 1970—2003 年的长期综合观测资料,系统分析了降雨和地下水对北京八宝山断层变形行为的影响,结果表明:降雨和地下水影响着区域构造应力—应力场的调整。运城东郭井 2007 年 10 月正式投入观测,经历了 2008 年汶川 8 级大地震以及 2009 年至今山西地震带发生的原平 4.2 级、高陵 4.4 级、河津 4.8 级地震,在这些地震前,东郭井水位多次出现阶变异常^[7]。但在 2012 年 8 月 2 日出现突降变化,其变化形态与以前有所不同,所以正确认识该次异常性质对于地

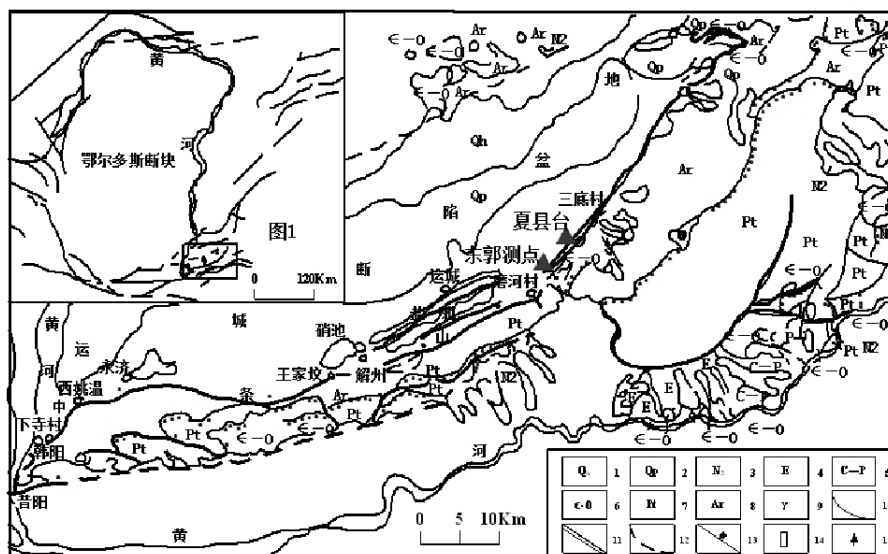
震预测工作来说就显得尤为必要。为此,根据《流体学科观测资料异常变化现场核实工作报告编写要求(试行)》,通过调查井孔周围地下水开采量变化、农田灌溉用水量变化、气象因素和两套仪器对比观测试验等多种方法,综合判定异常性质,运用多种异常识别方法,相互印证判断结果,提高了异常识别可靠性、全面性和有效性,该项工作对今后同类异常核实工作具有很好的借鉴作用。

1 井区地质及水文地质概况

东郭水井位于运城市东郭村,构造上位于中条山断裂呈弧形向东南的凸出点。中条山断裂长 137 km,走向 NE—NEE,倾向 NW,倾角 $58^{\circ}\sim 75^{\circ}$,为高角度正断层^[8];属于鄂尔多斯断块周边活动断裂系的东南部分,并且是运城断陷盆地和中条山断块隆起的分界(图 1)。根据构造不连续特征^[9],中条山断裂被分为 3 段,自东北向西南为:夏县段、解州段和韩阳段。而东郭水井处在夏县段断裂附近,夏县段断裂走向 $NE35^{\circ}$,长 40 km,基本由多条平行斜列的分断层组成,次级断层长度一般为 3 km 左右,断层间距 100~500 m;据夏县段三坡底村探槽剖面上有两次古地震事件(震级 7.7~8.1),发生于 102 Ka 以前,大震重复发生的时间间隔为 51 Ka,计算得出夏县断裂约 100 Ka 以来断层滑动速率为 0.44 mm/a,表明夏县断裂晚更新世期间仍有活动。

东郭水井位于汾渭断陷带的运城盆地。运城盆地走向近 EW 向,向东部转为 NE 向;其形成于晚第三纪的中新世。资料显示运城盆地新生代断陷幅度 5 600 m,第四纪最大幅度 1 600 m;相应地平均最大断陷速率分别是:晚第三纪为 0.3 mm/a,第四纪时期为 0.67 mm/a,晚新生代以来,运城盆地的断陷沉降有逐渐增强趋势。东郭水井处于夏县段断裂附近的沉降中心(图 2)。

东郭井区分为两个水文地质单元,即东郭山区基岩裂隙水及山前倾斜平原松散层孔隙水区。其中东部山区含水层为涑水群变质岩,风化裂隙十分发育,受大气降水直接补给及东部邻区侧向径流补给;西部平原 0~50m 以上含水层为卵砾石层,含水丰富;50~200m,含水层为粉细砂层,富水性较弱;200 m 以下含水层为胶结粉细砂,相对富水性较差。东郭井观测层为 480 m 以下第三系上新统松散岩,地下水类型为孔隙承压水。



1.第四纪全新统; 2.第四纪更新统; 3.新近系上新统; 4.古近系; 5.石炭-二叠系; 6.寒武-奥陶系; 7. 元古宇; 8.太古宇; 9.燕山期侵入岩; 10.地质界线; 11.不整合界线; 12.断层和推测断层; 13.中条山断裂; 14.探槽地点; 15.分段边界。

图 1 东郭测区地质构造略图与观测点分布图^[10-11]

Fig.1 The geological sketch map and distribution diagram of observation points in the survey area of Dongguo^[10-11]

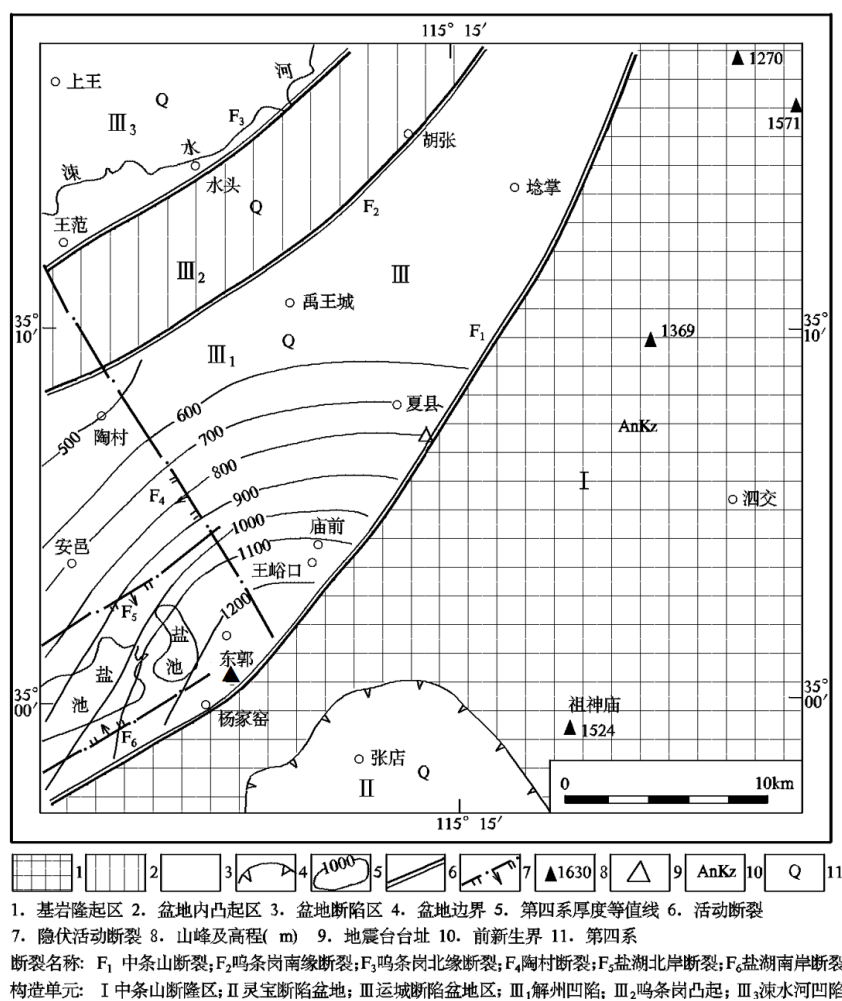


图 2 山西中条山地区水文地质图

Fig.2 The hydrogeologic map of Zhongtiaooshan area, Shanxi

2 东郭观测井基本情况

运城东郭井是山西省地震局自筹资金“十五”期间建成的一口地震地下流体观测井，位于运城市东郭镇，概略经度 111.1°、纬度 35.0°，海拔高程 400 m。井深 614.71 m，揭露的地层主要是第四系黏性土与第三系泥质胶结的细砂岩、粉砂岩，其中 0~50 m 为 Q3 亚砂土、灰黄色局部含砾石；50~200 m 为 Q2 亚砂土、亚粘土局部夹薄层粉细砂层；200~485 m 为亚粘土、亚砂土局部夹薄层粉细砂层，485~614 m 为 N2 细砂、粉细砂和粘土互层，是该井主要观测段，井孔结构见图 3。观测井内全部下设直径 146 mm 金属不变径套管，其中 485~606 m 井深的砂岩段下设滤水管，累积长度 80.79 m，485 m 以上全部黏土止水，对观测含水层的抽水实验结果为：含水层渗透性较弱， $K=0.12\text{ m/a}$ ，地下水化学类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}.\text{Ca}.\text{Na}$ ，矿化度 0.67 g/L ，地下水类型为孔隙承压水。

2011 年 4 月 16~17 日出现巨幅下降，16 日 12 时 57 分~17 日 05 时 18 分加速下降，降幅达 0.66 m，17 日 05 时~07 时突降 6.067 m，至 23 日累计下降幅度达 10.8 m(图 4a)。从图 5a 可以看出水位突降后没有恢复到原来状态，2011 年 9 月后达到新的平衡状态，水位曲线变化平稳，基本符合正常年变，呈缓慢下降；而水温由于受水位突降影响，短时出现峰值变化并很快恢复至原来的温度。

为了查清该井水位突降原因，2011 年 6 月 14 日山西省煤炭地质 148 勘查院晋水水井检测中心采用 SJ-2 型全景式水井彩色电视检测系统对东郭井进行了检测，探测井孔状况及井内异常状态，发现在 520 m 以下水中漂浮物增多，看不到井壁，到 550 m 处电视检测探头无法下行，淤泥增多，根据成井时套管长度推断，初步认为 552 m 下部套管焊缝受地层压力影响发生了破裂(错位)，导致淤泥掩埋了井孔，550 m 以下含水层被封闭，可能是水位下降的主要原因。水温探头安装深度 562 m，安装水温探头至 2011 年 4 月 16 日水温探头放置位置没有改变。2011 年 4 月 18 日使用滑轮装置提拉水温探头，无法提动，至今水温探头已被堵死提不动，水温日变幅由原来的千分位上变化成为万分位上变化(图 4b)，水温记录不正常，无法记录到观测井含水层水温变化。

鉴于此情况，2012 年 3 月 23 日使用中科光大有限公司 ZKGD3000-N 仪器进行水位、水温同井对比观测；水位探头埋深 5.32 m，为了防止水温

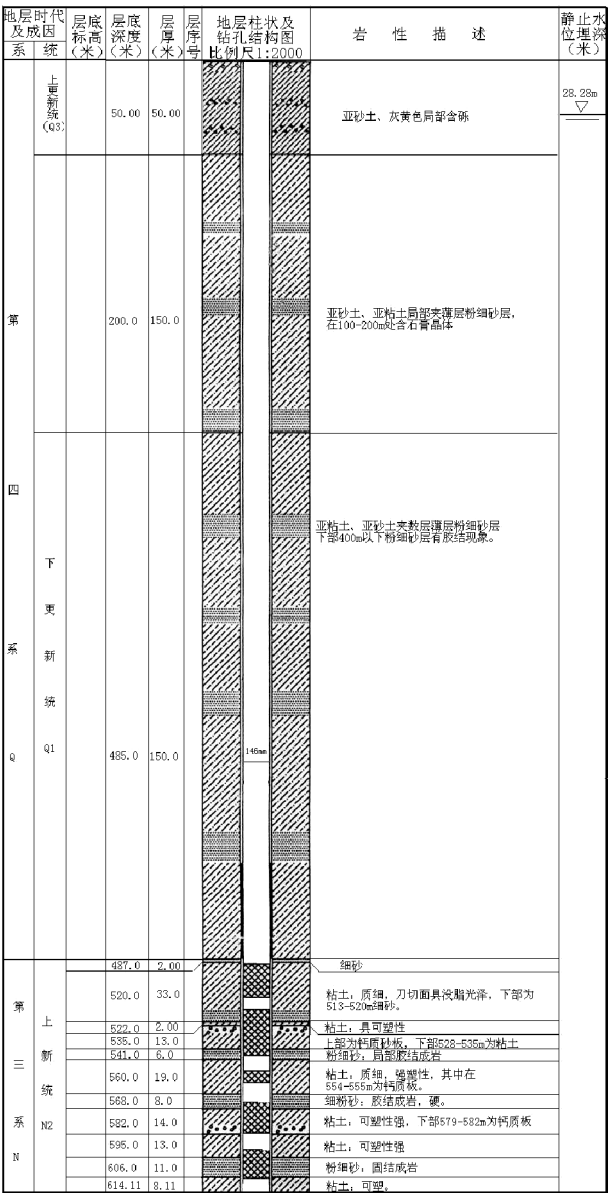


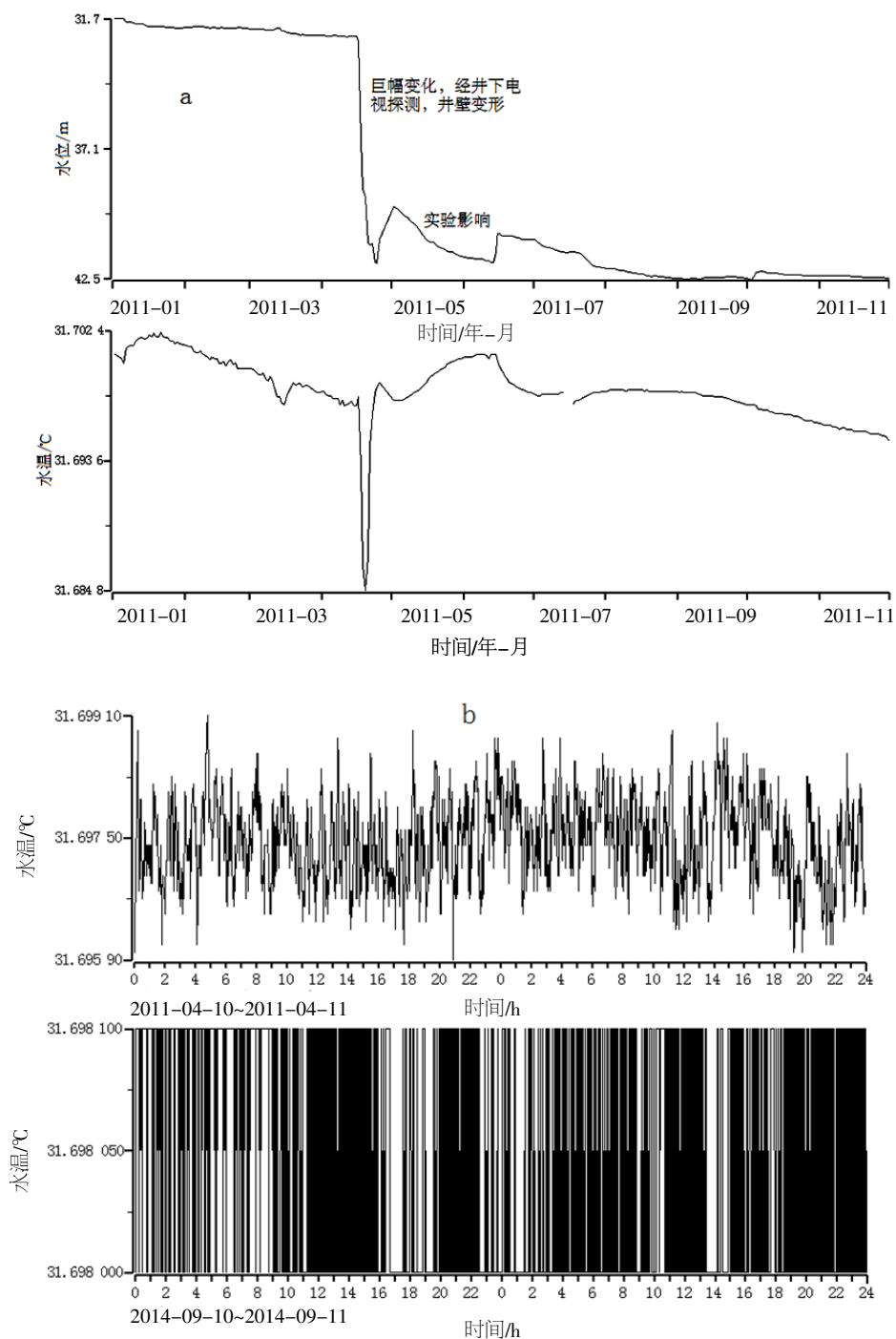
图 3 东郭观测井井孔柱状图
Fig.3 The wellhole histogram of Dongguo well

探头被淤泥掩埋，放置水温探头放置 495 m 处。

3 水位异常变化特征

2007 年 10 月 12 日该井投入观测，使用 LN-3A 数字化水位仪，当时实测水位 21.18 m，由于受区域地下水开采的影响，该井水位呈趋势下降(图 5)，水位的日变幅一般 $<0.01\text{ m}$ (图 5a)。

2012 年 8 月 2 日水位出现加速下降，至 8 月 31 日累计下降幅度为 73 cm(图 5b)，但同井观测水温没有变化。本次变化是该井始测以来出现的第一次水位加速下降变化，是什么原因引起水位变化，对此需要到现场进行核实。



(a) 2011 年 1~11 月水位、水温日变曲线; (b) 东郭井

图 4 东郭观测井水位、水温变化曲线及水温探头被堵死前后变化

Fig.4 The variation curve of water level and temperature Dongguo well and its variation before and after the water temperature probe blocked

4 异常调查及成因分析

4.1 观测系统检查

地下水观测仪器运行状况、线路、电压等因素可以引起异常变化, 因此我们首先对仪器运行状况、线路、电压等进行了检查。检查发现: 观测仪器工作正常; 现场校测水位埋深为 42.78 m

(水位仪记录水位为 42.80 m), 误差在允许范围之内, 符合规范要求; 水温仪、水位仪主机工作正常, 传感器灵敏度符合要求, 观测人员没有变化。

4.2 气象因素分析

收集 2007 年至今该区降雨资料, 图 6 给出东郭井水位和降雨量变化关系曲线, 从图 5 分析, 降雨量大的年份, 并不是水位变化大的年份, 水

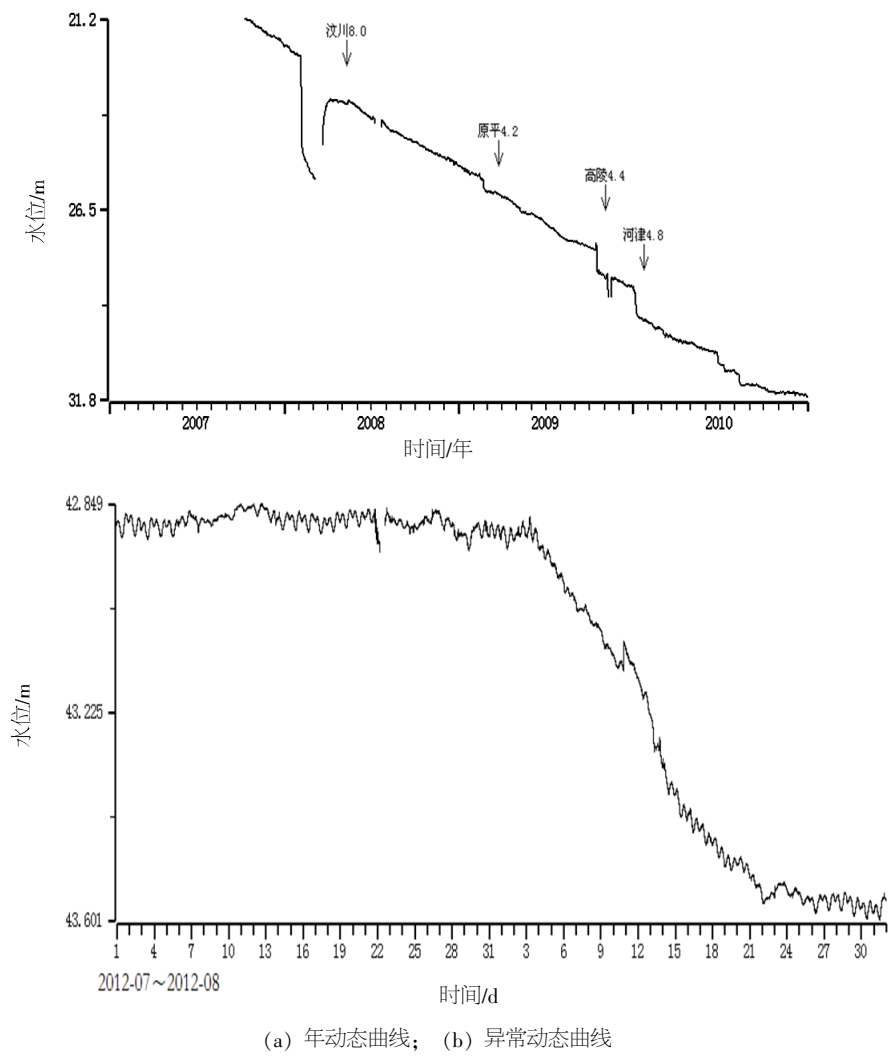


图 5 东郭井水位变化曲线

Fig.5 The variation curve of water level curve of Dongguo well

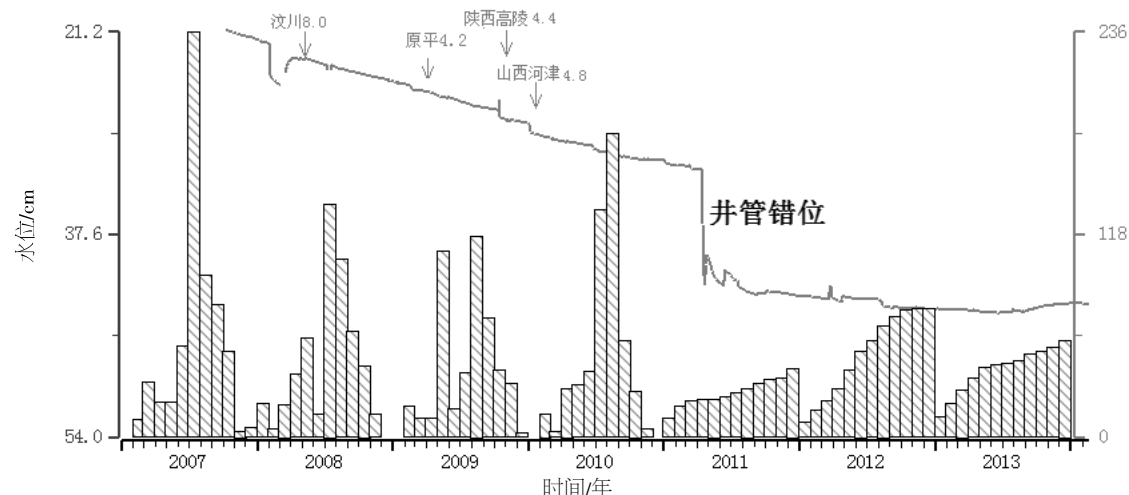


图 6 东郭井水位与当地降雨量累计变化曲线

Fig.6 The curves of the Dongguo well water level and the cumulative rainfall

位变化与降雨量多少没有直接关系。表 1 给出水位年变幅和年降雨量统计，可以看出，2012 年降雨量最大，水位年变幅 2.439 m；2009 年和 2013 年降雨量分别是 465.4 mm 和 465.3 mm，降雨量几

乎相同,而水位年变幅为 9.636 m 和 0.869 m,说明降雨与水位变化没有直接关系,可以排除降雨等气象因素的影响。

4.3 同井观测资料对比分析

为了检查仪器的稳定性、灵敏性,在东郭井增加一台中科光大生产的 ZKGD3000-N 仪器进行水位同井对比观测,水位探头埋深 5.32 m。2 套不同厂家生产的水位仪记录到的水位变化形态相同,观测结果见图 7,从图 7a 观测曲线分析,2 台套仪器变化形态非常相似,至 2012 年 8 月 25 日 LN-3A 变化幅度 42.4 cm, ZKGD3000-N 仪器所测水位变化幅度 42.7 cm,两台仪器误差为 0.3 cm。将两套仪器所测水位观测数据绘成同轴观测曲线(图 7b),曲线几乎重叠,说明仪器工作正常,无人为干扰,观测数据一致性好,数据变化真实、可靠。

4.4 地下水开采情况调查

该观测点位于运城市东郭村北边约 150 m 处,四周为农田。南距中条山山前断裂约 2 500 m,之间有村庄、农田。北距盐湖东部约 2 000 m,之间全部为农田,东西两侧为农田。整个地形呈南高北低,中条山山根至盐湖东部高差约 50 m,属中条山山前洪积扇。

对 2011 年周围 5 km 内开采井情况进行了调查,周围井孔情况没有变化,具体情况是:

表 1 东郭井水位年变幅、年降雨量统计表

Table 1 The statistics table of annual variable amplitude of Dongguo well water level and annual rainfall

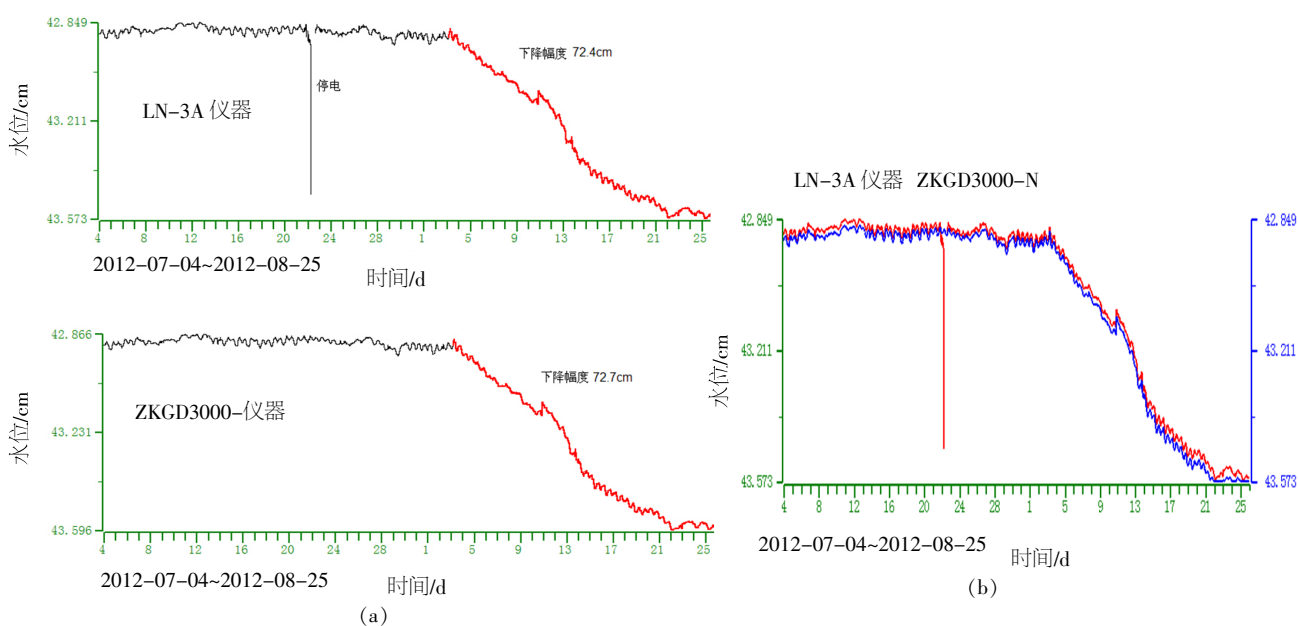
年 份	年降雨量/mm	水位年变幅/m
2007	579.5	
2008	502.7	3.424
2009	465.4	9.636
2010	507.2	3.093
2011	306.7	11.466
2012	572.6	2.439
2013	465.3	0.869

(1) 运城市盐湖区现有 8 眼 2 000~3 000 m 第三系热水开采井,其中 4 眼井用于冬季取暖,3 月底已停止供热;热水开采量明显减少,另外 4 眼用于洗浴的开采井,一年来用水量无大的改变。

(2) 在距东郭井约 1.5 km 处有一约 1 050 m 的第三系水井,该井原计划做为疗养院开采井,成井后,由于经费的原因时至今日一直都未启用。

(3) 在水珠国际大酒店施工基地新打 2 眼第三系水井,至今尚未投入使用。周围无新井开采,调查井孔基本情况见表 2。

从调查分析来看:①无同层开采新水井。② 500 m 范围内只有 100~150 m 深的井抽水。③ 20 至 40 m 浅层井正常抽水。由此可见,东郭观测井是 614.71 m 深井,浅井开采对此井不会造成影响,水位变化与周边浅井抽水无关。



(a) 两套仪器对比曲线; (b) 两套仪器同轴对比

图 7 两套仪器对比观测实验结果

Fig.7 The comparative experimental results of two sets of instruments

表 2 周边井孔基本情况

Table 2 The general information of nearby wellhole

调查井位置			井深/m	用途	距观测井距离/km	备注
地点	经度/°	纬度/°				
东郭镇	35.033 9	111.12	20	浇地	0.88	
下月村	35.034 4	111.144 2	废弃		1.89	共 3 口井
白庄村	35.025 8	111.146 1		浇地饮用	2.07	共 5 口井
上月村	35.028 1	111.151 1	110	浇地	2.66	共 5 口井

4.5 水位变化形态分析

(1) 东郭井水位始测以来由于受区域性地下水开采的影响，该井水位趋势下降(图 7)，年降幅达 10 m。由于该井测试的物理量为 500 m 以下第三系 N2 封闭层承压水的水压变化，该变化与浅层基岩应变位移具有一定联系。

(2) 从图 8 可以看出，2011 年 4 月 16 日东郭井水位出现巨幅突降，累计下降幅度达 10.8m，现场核实认为巨幅变化非构造活动引起。之后水位达到新的平衡，水位尚未恢复到原来水平。其年变形态呈缓慢下降，符合正常年变。

(3) 人为干扰。从图 7 可以看出 2012 年出现的几次阶变，系调整探头、架同步测量仪器干扰所致。其中调整水温探头水位表现为上升，之后缓慢恢复；架设同步仪器为阶跃脉冲。

4.6 震例分析

东郭观测井2008年始测以来，经历了2008年汶川8.0级大地震以及2009年至今山西地震带原平4.2级、高陵4.4级、河津4.8级地震，在这些地震前18~96 d内分别对应了地震，虽然震中距不同，但变化形态相似，刘国俊^[7]对其变化的映震能

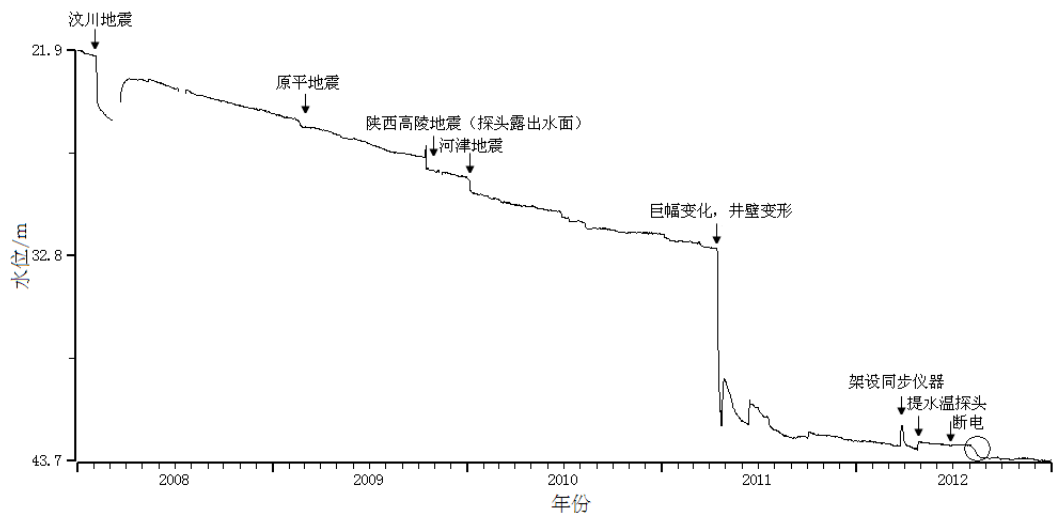


图 8 夏县东郭井始测以来水位变化情况

Fig.8 The variation of Dongguo well water level since the observation

力进行过研究，东郭井水位多次出现同步阶变异常，异常特征皆表现为水位突降(图 9)，表 3 给出东郭井始测以来震例特征统计表，该井映震能力比较好。

4.7 固体潮变化形态分析

井水位对地壳动力过程响应的敏感性已被井水位固体潮效应、气压效应、地震波记录、断层蠕动

效应等一系列观测及实验所证实，这为地下水动态预报地震奠定了可靠的物理基础。固体潮是一种由月亮和太阳的引力造成地球粘弹性形变现象，它是人们唯一能够事先计算出来的地球物理现象。固体潮是在日月引潮力的作用下，地球产生的周期形变的现象，承压井水位固体潮反映了较局部的含水层应力应变情况，因此它更利于研究地壳局部的不均匀性，更利于研究局部应力应变的演变情况，更有

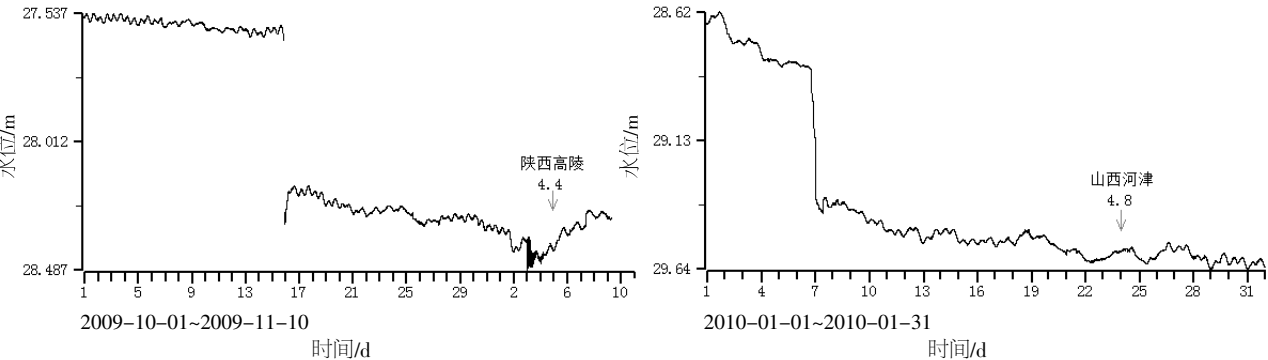


图 9 东郭井水位与地震活动对应关系

Fig.9 The correspondence between the water level of Dongguo well and seismic activity

表 3 东郭井水位震例统计表

Table 3 The statistics table of earthquakes cases of water level of Dongguo well

序号	异常日期	异常起止时间	异常持续时间	异常形态	异常幅度/m	地震
1	2008-02-06~02-10	6d08h15m~9d14h23m	78h08min	阶降→缓降	2.259	2008 年 5 月 12 日 汶川 8.0 地震
2	2009-02-21	00h06~22h01m	21h55m	缓降	0.266	2009 年 3 月 28 日 山西原平 4.2 级地震
3	2009-10-15~10-16	15d20h32~16d04h46m	8h12m	阶降→缓升	1.084	2009 年 11 月 5 日 陕西高陵 4.4 级地震
4	2010-01-06~01-07	06 d19h22m~07d01h15m	05h53m	突降→缓降	0.503	2010 年 1 月 24 日 山西河津 4.8 级地震

希望捕捉到地震前兆信息^[10,13-14]。

图 10 给出两套仪器 2012 年 8 月水位分钟值观测曲线，从变化曲线分析，固体潮变化形态正常。2011 年出现井管错位，之后达到新的平衡，

2012 年 8 月水位出现的变化形态和 2011 年以前的变化形态不同。因井管泄漏，会造成井水扰动，因而影响固体潮的变化；若构造活动剧烈，固体潮应该畸变，但固体潮变化正常。

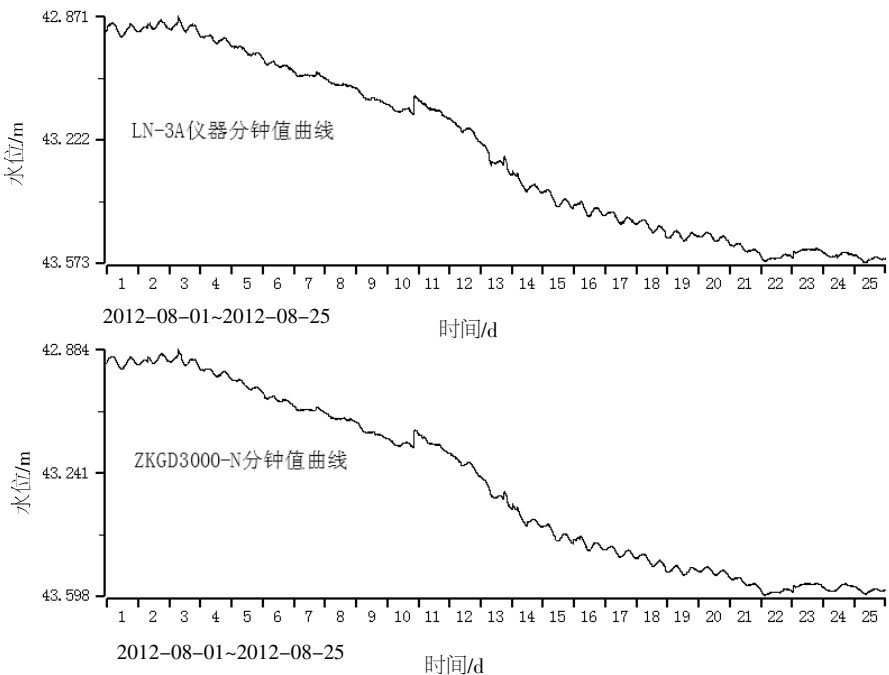


图 10 东郭井水位固体潮记录曲线

Fig.10 The tidal curve of Dongguo well water level

4.8 水位变化与构造活动关系分析

东郭观测井位于运城盆地南缘,中条山山前断裂与东郭-三路里隐伏断裂交汇处(见图1)。中条山山前断裂为第四系全新世活动断裂(Q4正断层),东郭-三路里隐伏断裂活动其性质不明(根据有关资料,认为是上新世N2活动断裂),但该断层北端1986年曾有4.6级震群活动。断层交汇处是构造应力场集中点,同时也是深层封闭井水位观测的灵敏点。该观测水井的缓慢下降变化,可认为与断层应变位移速率有关。实质上,水井下降变化是由于地下水压减少的结果;水压的减少,又导致含水层岩石颗粒之间的有效应力的增加;而有效应力增加,则可抑制断层滑动,减低断层应变的位移速率。

按照一般井水位动态与井区含水层受力状态关系的理论,认为井水位下降表示了井区受拉张应力的作用,即含水层岩体被拉张,孔隙率增大,孔隙压力减小,井筒内的水流回到含水层中,表现为井水位下降。按照这样的理论,东郭井近几年来应力处于松弛状态,而且松弛过程是幕式的。这样的状态,可能与中条山大断裂南端的幕式滑动有关。

5 结语

东郭流体观测井处于断层交汇位置,构造应力场相对集中点,是一口映震灵敏井观测。2008年始测以来,出现的几次阶降,降幅在0.3~1.1m,比较好的对应了山西原平4.2级、陕西高陵4.4级和山西河津4.8级等地震,尤其是在高陵和河津地震前对异常进行了比较好的追踪。

经现场调查核实,本次异常变化无人为干扰,观测系统工作正常,观测环境没有变化,降雨对深井影响比较小。

东郭井水位数据变化真实,根据该井震例分析及该井所出的构造位置,认为水位变化异常与运城盆地南缘中条山山前中部断裂带以及运城盆地中部东郭-三路里隐伏断裂带构造活动有关,但地震只是构造活动的一种形式,且是地壳深部构造活动的形式之一,因此地震与异常的关系,在相当多的情况下是伴生关系,而不是因果关系,目前利用浅层构造活动产生的异常信息预测深层地震活动,可能反应了近期构造应力的变化,但不能作为“必震”异常信息。

另外,建议通过洗井,使水循环速度加快,能够更好的反映地下深部信息。

参考文献:

- [1] 刘耀伟,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.
- [2] 车用太,鱼金子.地下水动态映震机制的试验与观测研究[J].地震研究,1992,15(2):171-179.
- [3] 车用太,鱼金子,张大维.北京平原区基岩井水位的年动态特征及其成因分析[J].地震地质,1994,16(3):255-263.
- [4] 车用太,刘成龙,鱼金子,等.判别地下水异常的干扰性与前兆性[J].地震学报,2011,33(6):800-808.
- [5] 车用太,刘成龙,鱼金子.地下流体观测环境的评估指标-干扰度[J].地震,2005,25(3):63-68.
- [6] 黄辅琼,陈颢,白长青,等.八宝山断层的变形行为与降雨及地下水的关系[J].地震学报,2005,27(6):637-646.
- [7] 刘国俊,张文男,杨海祥,等.东郭井水位与水温成组异常及其映震特征[J].华北地震科学,2012,30(1):22-28.
- [8] 苏宗正,程新原,安卫平,等.山西运城盆地的中条山断裂活动断裂研究(8)[M].北京:地震出版社,2001.
- [9] 程绍平,杨桂枝.山西中条山断裂带的晚第四纪分段模型[J].地震地质,2002,24(3):289-301.
- [10] 山西省地质矿产局.山西省区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.
- [11] 谢又予,李炳元.从第四纪沉积相的分析探讨汾渭盆地新构造运动特征/[M]中国科学院地理研究所.地理集刊(10).北京:科学出版社,1976:52-70.
- [12] 张昭栋,王宝银,高玉斌,等.中国地下水潮汐的观测研究和分析[J].地震学报,1989,11(4):392-401.
- [13] 龚永俭,陈嵩,程立康,等.宝坻新台井水位对地下水开采的响应特征及机理探讨[J].华南地震,2015,35(2):1-9.
- [14] 解晓静.海南省井水位的数字化观测在地震前兆监测中的效能[J].华南地震,2015,35(2):28-36.