

从地下水变化分析临汾地震台短水准异常的成因

孟彩菊^{1,2} 王秀文^{2,3} 张淑亮^{2,3} 杨世英^{1,2}

1 山西省地震局太原基准地震台,太原市晋祠镇,030025
2 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站,太原市晋祠镇,030025
3 山西省地震局,太原市晋祠路二段 69 号,030021

摘 要: 利用深水井水位数据、龙子祠泉流量资料及临汾地震台短水准所在区域内的长观孔水位资料,分析临汾地震台及周边地区地下水整体变化状态,根据区域水位变化特征对临汾地震台短水准近年来出现的异常进行分析。结果表明,临汾地震台短水准测量场地周边区域地下水位在 2011~2013 年发生明显变化,与水准观测曲线变化趋势较为一致,水准异常时间滞后于水位变化 2~3 a;而大范围水位上升尤其是浅水井水位明显上升主要是因为地下水开采量减少,非构造所致。水位上升引起平原区地面回弹的现象符合 Terzaghi 有效应力原理,即水位回升使孔隙水压力得到恢复,砂层回弹进而引起地面回弹,并引起短水准高差测值的变化。

关键词: 地下水干扰;形变;异常;水位变化

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

2014 年起,临汾地震台短水准 BM4-BM1 测线高差值变化趋势发生明显转折,由于该测项位于历史上强震多发的临汾盆地,所以引起同行专家的关注。研究认为,在对形变造成影响的各种干扰中,地下水为一种较为常见的因素^[1-2]。王秀文等^[3]和孟彩菊等^[4-5]研究了地下水变化对太原台水准高差测值及代县应变的影响,认为水位与形变观测结果具有较好的相关性;荆红亮等^[6]认为,临汾地震台短水准与距离约 2.0 km 的北杜井水位变化趋势不同,相关性较小。本文通过收集深水井水位数据、龙子祠(龙祠)泉流量资料及临汾地震台短水准所在区域内的长观孔水位资料,总结临汾地震台及周边地区地下水整体变化状态,并对其不同变化特征进行分析,最后根据区域水位变化特征探讨近年来临汾地震台短水准出现异常的原因。

1 临汾地震台短水准观测概况

临汾地震台位于临汾市尧都区西部约 17 km 处,距龙祠村约 1.5 km。观测场地位于临汾盆地西缘,监测部位为龙祠断裂及马头山断裂北部,属于罗云山断裂的分支,延伸长度约 27 km,断面倾角约 70°,走向 NE30°,倾向 SE,为东盘下降、西盘

上升的正断层,断距约 150 m。水准测线为“U”形线路,线路总长 540 m,有 2 个基岩点(BM1 和 BM2)、2 个土层点(BM3 和 BM4)及 16 个测站,可以分为 3 个测段,其中 BM2-BM3 和 BM4-BM1 测线(测段)跨越断层,具体线路布设见图 1。

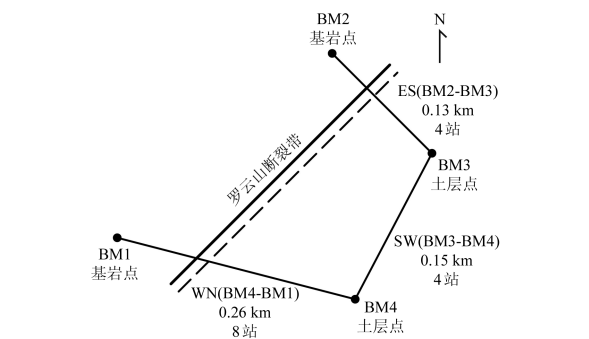


图 1 临汾地震台短水准线路布设图
Fig. 1 Layout of short-leveling line at Linfen seismic station

临汾地震台短水准自观测以来 BM2-BM3 和 BM4-BM1 测线高差曲线呈一定斜率的拉张特征,反映罗云山断裂的上盘向盆地侧下降的运动趋势,为山西断陷盆地继承性运动的表现。张仰辉^[7]和刘瑞春等^[8]研究认为,BM4 土层点较 BM3 土层点稳定,BM4-BM1 测线可真实地反映监测断层的变化状态,故本文提到的水准分析均指

收稿日期:2020-01-08
项目来源:山西省地震局重点科研项目(SBK-1933)。
第一作者简介:孟彩菊,高级工程师,主要从事地震监测及地震数据分析研究,E-mail:mengcaiju@126.com。
通讯作者:王秀文,研究员,主要从事地震预报研究,E-mail:wangxiuwen1963@163.com。

BM4-BM1 测线高差数据。

2 临汾地震台短水准测量场地周边地下水动态分析

多年的观测资料表明,短水准与地下水位具有较好的动态相关性,本文在水准观测场地周边地下水数据的基础上,通过趋势动态对比对临汾地震台短水准近年来的异常变化进行干扰影响分析。

图 2 为临汾地震台短水准测量场地及周边 10 个地下水位观测井(泉)的空间分布,断层西侧为山区,无井孔点,沿断层分布的井(泉)包括土焦坡井、龙子祠泉、北杜井及西梁井,向市区方向分布于平原区的井(泉)包括襄陵井、高河店井、王庄井、临汾局井、襄汾井及邓庄井。西梁井、襄汾井及邓庄井的数据缺失,故本文不进行分析。临汾局井深 600 m,其余各井深度均相对较浅,在几十米至 100 m 之间,各井距离水准观测点约 1.0~14.0 km。

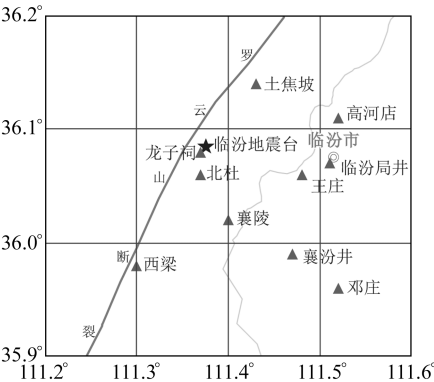


图 2 观测井(泉)分布
Fig. 2 Distribution of observation wells

图 3 为 2000~2018 年各观测井水位和泉流量的观测值曲线,从图中可以看出,承压水井(临汾局井)水位呈下降趋势,多年水位变化较平稳;龙子祠泉流量观测曲线为起伏波动型,与相距约 1.0 km 的北杜井流量动态较为接近;土焦坡井靠近断层,水位呈上升趋势;松散层观测井中,高河店井、王庄井及襄陵井水位表现为下降速度减小或止降回升的趋势。

3 临汾地震台短水准异常与同期地下水位动态特征对比

地下水的变化与地面形变关系密切,是影响水准测量值变化的主要干扰因素。图 4 为临汾局井水位及龙子祠泉流量与临汾地震台短水准对比图,图中较粗的曲线为临汾地震台短水准,为便于比较,水准高差曲线坐标为反向坐标。从图 4 可

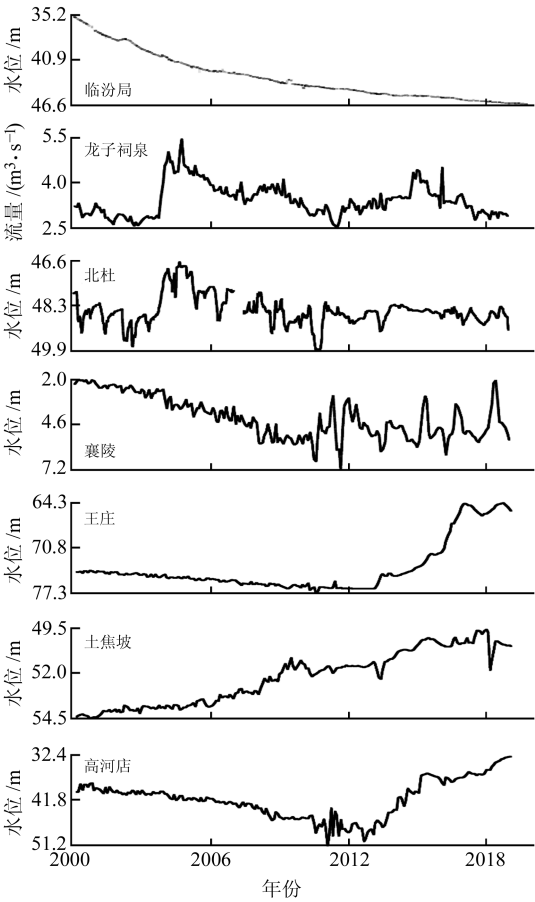


图 3 2000~2018 年各测点水位变化趋势
Fig. 3 Water level change trend of each observation point from 2000 to 2018

以看出,临汾局井水位与水准高差曲线的变化趋势基本相同,2014 年水准变化速率减缓甚至出现反向变化,但井水位并未出现明显转折现象,仅下降趋势变缓;龙子祠泉流量与临汾地震台短水准高差曲线的变化趋势差异较大,在泉流量明显增大的情况下,水准高差曲线的下降趋势变缓,即出现上盘测点相对上升的现象,如 2004 年流量增大后,2006~2008 年水准曲线也出现速率减缓的张性变化现象;2012 年泉流量缓慢上升,水准曲线在泉流量转折 2 a 后也出现转折。

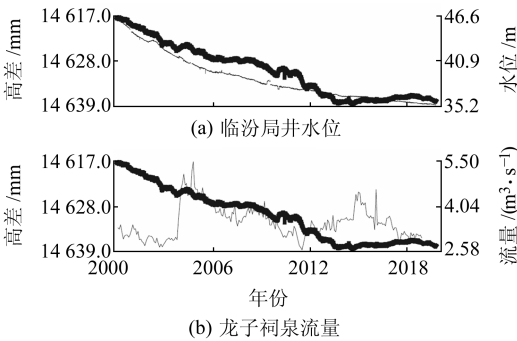


图 4 与临汾地震台短水准的动态趋势对比
Fig. 4 Dynamic trend comparison with short-leveling in Linfen seismic station

图 5 为第四系松散层观测井水位与临汾地震台短水准的动态曲线对比,从图中可以看出,井水位曲线在 2011~2013 年均出现转折变化,其中襄陵井水位从持续下降转为平缓趋势,王庄井水位由下降转为上升趋势,高河店井水位变化与王庄井相似,由下降转为上升;而在 2014 年临汾地震台短水准出现转折前,观测井水位均出现明显的趋势性变化。

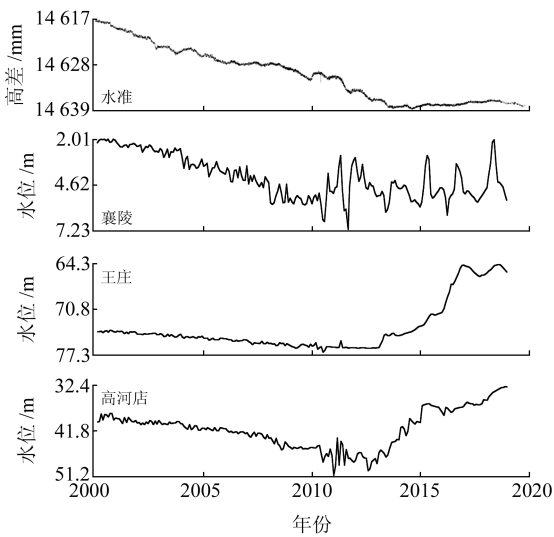


图 5 临汾台周边井水位与水准高差动态对比
Fig. 5 Dynamic comparison of leveling height difference and water level of wells around Linfen seismic station

综上所述,2011~2013 年临汾地震台短水准测量场地周边区域的地下水位均发生明显变化,随后水准也出现转折,且时间上明显存在 2~3 a 滞后。

4 临汾地震台短水准异常原因分析

4.1 井水位动态变化原因

地壳形变与地下水相互作用又相互影响,两者会在应力作用下发生变化,也可能同时受环境或人为因素干扰,故需进行排查。除临汾局观测井为承压水井受各类地表及气象因素干扰影响较小外,其他松散层观测井水位及泉水流量受降雨和地下水开采影响较大,易出现形态各异的变化特征,故需进行降水影响分析。

4.1.1 降水影响

图 6 为 2000~2018 年龙子祠泉流量变化趋势与临汾地区降水量对比,由图可知,2004 年泉流量在快速突升前降水量明显偏大,2008~2009 年泉流量出现小幅上升前降水量也出现小幅增大现象,2015 年前后泉流量曲线再次表现为上升变化,对应的 2011 年及 2013~2014 年降水量也明

显增多。多次准同步变化显示,龙子祠泉流量形态受降水影响明显,而从图 3 各井水位动态变化趋势来看,除龙子祠泉附近的北杜井受 2003 年降水影响出现“鼓包”外,其余井水位形态均无明显变化,近几年出现的止降回升共性变化可能受其他因素影响。

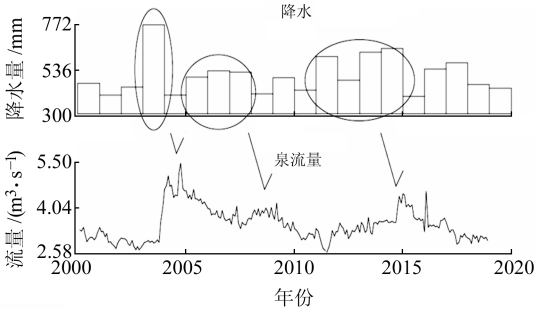


图 6 龙子祠泉流量变化与降水量对比
Fig. 6 Comparison of flow change and precipitation in Longzici spring

4.1.2 地下水开采影响

图 7 为 2008~2018 年临汾地区地下水开采量变化,由图可知,2011 年起地下水开采量逐年减少,地下水开采量减少的起始时间与本文第四系松散层观测井水位变化趋势的转折时间大致同步。《临汾市水资源公报(2009~2017)》^[9]指出,临汾市政府近年来采取关停地下水井、调用其他水源引水等措施,减少地下水的开采,使城区内的超采区降落漏斗呈基本稳定趋势。因此,本文第四系松散层观测井水位的变化趋势与地下水开采量的减少密切相关。

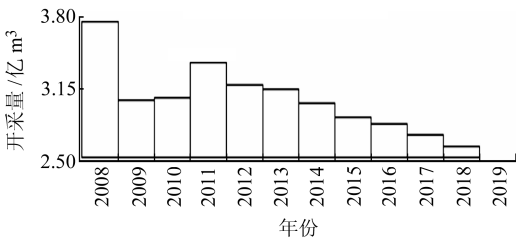


图 7 临汾地区地下水开采量变化
Fig. 7 Variation of groundwater exploitation in Linfen area

4.2 地下水动态特征差异原因分析

分析显示,各井水位(泉流量)受降水、地下水开采等因素影响,动态变化特征存在明显差异,其中承压深水井受地表及气象因素影响较小,变化稳定,而第四系松散层观测井水位及泉流量的变化较大。席胜蓉^[10]认为,龙子祠泉的形成主要受区域构造,特别是罗云山-龙门断层的影响和控制;许绍倬等^[11]提出,龙子祠泉泉水温度常年在 17℃左右,年变幅小于 0.5℃,比山前地带第四系孔隙水水温略高 3~5℃,泉水化学类型及矿化

度年变化与山前孔隙水差异明显。

研究结果表明,各井水位(泉流量)的形态差异受所处区域的环境气候、水文、地质及人类活动等因素影响。龙子祠泉泉水主要来源于上游大面积碳酸盐岩地区降水,与降水量密切相关,其中北杜井位于龙子祠泉出水区附近,距离泉水排泄渠小于 1 km,其趋势形态变化与泉水流量存在一定程度的相似性;土焦坡观测井距离龙子祠泉较远且靠近断层,其形态为持续上升型,与其他点均不同,不具代表性;而本文所选的距离台站较远的第四系观测井的开采层是与工业开采、生活用水相关的地层,且观测井位于人类生活及生产的主要区域,其水位变化受地下水开采量的影响较为明显。由此可知,近 10 a 来临汾地区地下水开采量持续减少是造成研究区内第四系地下水呈现止降回升的主要因素。

4.3 区域地下水变化对水准高差影响机理分析

受研究区内第四系地下水止降回升现象的影响,临汾地震台短水准高差形态出现明显转折,该短水准 M4 测点所处的第四系松散层出现回弹变化符合 Terzaghi 有效应力原理。研究表明^[12-13],开采承压水或半承压水会使测压水位下降,孔隙水压力降低,砂层骨架发生压缩;当测压水位恢复到原有高度时,孔隙水压力恢复,砂层和地面出现回弹(由于砂粒排列不可能完全恢复原状,砂层与地面不会完全回弹,粘性土层会发生压密现象)。胡惠民等^[14]通过多次抽水实验来研究水位变化对水准观测的影响,结果表明,距离观测井最近的水准点在抽水完成后均出现下沉,抽水结束后 4~5 d 内,部分水准点基本恢复到原有测值,部分未恢复到原始点,存在一定量的下降残余,且残余量存在一定差异。

上述实验及理论可很好地解释临汾地震台短水准转折变化的原因:地下水大范围回升,岩土层中的空隙得到地下水补充,孔隙水压力恢复,砂层回弹引起地面回弹,影响 BM4 土层点与 BM1 基岩点相对高度(高差)发生变化。

5 结 语

1)龙子祠泉流量及其附近的北杜井水位变化形态与其他距离台站较远的第四系井水位动态变化存在差异,其原因为龙子祠泉附近区域地下水受水文地质条件影响,补给和径流、排泄条件与观测井不同,主要为大气降水入渗。北杜井距离龙子祠泉的排水渠小于 1 km,一定程度上受泉流量影响,而第四系地下水的水位受工业开

采影响显著。

2)龙子祠泉流量变化趋势与水准观测曲线不完全匹配,尤其是在 2014 年水准明显转折时段,泉流量并未出现大幅度上升变化;龙子祠泉附近的北杜井 2014 年前后曲线变化平稳,无明显转折,与水准转折变化无对应关系。

3)2011~2013 年临汾地震台周边区域第四系井水位普遍存在上升或下降减缓现象,2011 年起临汾地区地下水开采量持续减少。分析认为,井水位上升主要是因为地下水开采量减少,大范围井水位上升,尤其是浅水井水位明显上升非构造因素所致。

4)临汾地震台短水准高差转折与区域井水位变化存在对应关系,高差变化滞后于井水位变化 2~3 a。地下水水位上升引起平原区地面回弹符合 Terzaghi 有效应力原理,即水位回升使孔隙水压力得到恢复,砂层回弹引起地面回弹,从而使高差测值发生变化。

5)以往研究中一般更注重台站附近单点水位的资料分析,本文研究结果显示,研究地下水水位时需要注重观测点周边较大范围内地下水的影响,因为单点数据存在片面性,无法作出合理解释。由此可知,在对各形变异常进行研究时,应结合各种来源及多井点地下水资料进行综合分析,并充分参考系统外跨行业的水文数据及文献资料。

参考文献

- [1] 张凌空. 抽水时体应变大幅度波动成因的探讨[J]. 西北地震学报, 1992, 14(4): 55-60 (Zhang Lingkong. A Preliminary Study on the Reason of a Big Amplitude Changes of Volume Strain for Drawing Water[J]. Northwestern Seismological Journal, 1992, 14(4): 55-60)
- [2] 陆明勇, 牛安福, 陈兵, 等. 地下水位短临异常演化特征及其与地震关系的研究[J]. 中国地震, 2005, 21(2): 269-279 (Lu Mingyong, Niu Anfu, Chen Bing, et al. Study on the Short-Impending Anomalous Evolutionary Characteristics of Groundwater Level and Their Relationship with Earthquake[J]. Earthquake Research in China, 2005, 21(2): 269-279)
- [3] 王秀文, 李自红, 沈晓松, 等. 地下水变化对太原台水准形变异常的影响研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(11): 1 107-1 110 (Wang Xiuwen, Li Zihong, Shen Xiaosong, et al. Influence and Research on Leveling Deformation Anomaly in Taiyuan Station, Shanxi[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(11): 1 107-1 110)
- [4] 孟彩菊. 太原地震台短水准受水位影响分析及异常识别[J]. 地震地磁观测与研究, 2010, 31(1): 77-83 (Meng Caiju. Analysis on the Water Level Affection and Anomaly Identification of Short Leveling in Taiyuan Seismic Station

[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2010, 31(1): 77-83)

[5] 孟彩菊,杨世英,刘晓萍,等.代县地震台体应变异常与山西地震带有感地震对应关系[J].地震地磁观测与研究, 2017, 38(1): 96-101(Meng Caiju, Yang Shiying, Liu Xiaoping, et al. The Correlation between Body Strain Observation Anomalies at Daixian Seismic Station and Felt Earthquake in Shanxi Seismic Belt[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(1): 96-101)

[6] 荆红亮,杨静,韩磊,等.关于临汾台短水准异常物理性质的几点认识[J].山西地震,2018(4): 11-14(Jing Hongliang, Yang Jing, Han Lei, et al. Some Views on the Physical Properties of the Short Term Leveling Anomalies in Linfen Station [J]. Earthquake Research in Shanxi, 2018(4): 11-14)

[7] 张仰辉.浅析山西临汾中心地震台定点水准测段高差的变化特征[J].山西地震,2004(3): 22-24(Zhang Yanghui. Brief Analysis of Variation Characteristics of Altitude Difference at the Leveling Sections of Linfen, Shanxi, Central Seismological Observatory[J]. Earthquake Research in Shanxi, 2004(3): 22-24)

[8] 刘瑞春,季灵运,齐浪,等.临汾龙祠地震台水准测量巨幅形变异常综合分析[J].大地测量与地球动力学, 2012, 32(4): 20-24(Liu Ruichun, Ji Lingyun, Qi Lang, et al. Comprehensive Analysis of Huge Leveling Deformation Anomaly at Linfen Longci Seismostation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2012, 32(4): 20-24)

[9] 临汾市水利局.临汾市水资源公报(2009~2017)[R]. 2017 (Linfen Water Conservancy Bureau. Linfen Water Resources Bulletin(2009-2017)[R]. 2017)

[10] 席胜蓉.龙子祠泉域水环境特征[J].科技情报开发与经济, 2008,18(3): 127-130(Xi Shengrong. The Features of the Water Environment of Longzici Spring Area[J]. Sci-Tech Information Development and Economy, 2008, 18(3): 127-130)

[11] 许绍倬,王恒纯,李勇,等.山西龙子祠泉岩溶水系统分析[J].地球科学:中国地质大学学报, 1991, 16(1): 19-33(Xu Shaozhuo, Wang Hengchun, Li Yong, et al. The Analysis of Longzici Spring Karst-Water System in Shanxi [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1991, 16(1): 19-33)

[12] 王大纯,张人权,史毅虹,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社,1986(Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong, et al. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986)

[13] 张人权,梁杏,靳孟贵,等.水文地质学基础[M].北京:地质出版社, 2011(Zhang Renquan, Liang Xing, Jin Menggui, et al. Fundamentals of Hydrogeology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011)

[14] 胡惠民,金祖彬,匡绍君,等.地下水位变化引起的地面形变[J].地震学报,1981, 3(3): 276-282(Hu Huimin, Jin Zubin, Kuang Shaojun, et al. Ground Surface Deformation Caused by the Change of Ground Water Level[J]. Acta Seismologica Sinica, 1981, 3(3): 276-282)

Analysis of Short-Leveling Anomaly in Linfen Seismic Station Based on the Groundwater Change

MENG Caiju^{1,2} WANG Xiuwen^{2,3} ZHANG Shuliang^{2,3} YANG Shiying^{1,2}

1 Taiyuan Reference Seismological Station of Shanxi Earthquake Agency, Jinci Town, Taiyuan 030025, China
2 National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Jinci Town, Taiyuan 030025, China
3 Shanxi Earthquake Agency, 69 Second-Jinci Road, Taiyuan 030021, China

Abstract: Based on water level data from the deep well, the flow data of Longzici spring, and water level data of some long-term observation holes in the structural area of Linfen seismic station, we analyze the overall change of groundwater state at Linfen seismic station and its surrounding areas. We further analyze the short level anomalies at Linfen seismic station in recent years according to the characteristics of regional water level change. The results show that the groundwater level of Linfen short-leveling site and surrounding areas changes significantly from 2011 to 2013, which is consistent with the change of the leveling observation curve. The time of leveling anomalies lags behind the change of water level by 2-3 a. The rising water level in a large range, especially in shallow water wells, which is caused by the decrease of groundwater exploitation not by structure. The ground rebound caused by water level rise accords with the principle of Terzaghi effective stress; that is to say, the water level rise recovers the pore-water pressure, the sand layer rebound and then causes the ground rebound, which further causes the change of the short-leveling height difference measurement value.

Key words: groundwater disturbance; deformation; anomaly; water level change

Foundation support: The Key Scientific Research Projects of Shanxi Earthquake Agency, No. SBK-1933.
About the first author: MENG Caiju, senior engineer, majors in seismic monitoring and seismic data analysis, E-mail: mengcaiju@126.com.
Corresponding author: WANG Xiuwen, researcher, majors in earthquake prediction, E-mail: wangxiuwen1963@163.com.