

The Statistical Data of Water Level Monitoring of the Yue Zhuang Deep Well and Analysis on Coseismic Response Characteristics

Bing Liu^{1,2}, Hui Fu³, Feng Wang², Musen Li^{1,2*}

¹School of Materials Science and Engineering of Shandong University, Jinan Shandong

²Shandong Engineering Research Centre for Superhard Materials, Zoucheng Shandong

³Zoucheng Seismological Bureau, Zoucheng Shandong

Email: soldier-04@163.com, *msli@sdu.edu.cn

Received: Feb. 2nd, 2016; accepted: Feb. 21st, 2016; published: Feb. 25th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The earthquake can change stress state around geological structure so as to cause stress change in the aquifer layer and a synchronous change of the deep well water level. This paper dealt with the seismic response characteristic based on the special geological structure of Zoucheng City in Shandong Province and the water level monitoring statistical data of the Yue Zhuang deep well. The research results showed that this deep well had a good response ability to the seismic above ML4.0 level. The recorded coseismic response characteristics can be divided into five kinds in which the ladder and the wave modes are occurred in higher frequency. Therefore the water level monitoring statistical data and seismic response characteristic of the deep well can be used to provide a good way for earthquake monitoring.

Keywords

Earthquake, Statistical Data, Water Level Monitoring, Coseismic Response

岳庄深井水位监测数据统计与地震同震响应特征分析

刘兵^{1,2}, 傅辉³, 王风², 李木森^{1,2*}

*通讯作者。

¹山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南

²山东省超硬材料工程技术研究中心, 山东 邹城

³邹城市地震局, 山东 邹城

Email: soldier-04@163.com, *msli@sdu.edu.cn

收稿日期: 2016年2月2日; 录用日期: 2016年2月21日; 发布日期: 2016年2月25日

摘要

地震会造成震源周围地质结构的应力状态变化, 导致含水层的受力状态相应改变, 因而深井的水位也会出现同步变化。本文针对山东省邹城市的特殊地质结构, 以该市岳庄深井所记录的水位监测数据统计结果为基础, 进行了地震同震响应特征分析。结果表明, 该深井的水位变化对ML 4.0震级以上地震呈现良好的同震响应特征; 记录的地震同震响应特征可分为五种类型, 其中阶梯型和振荡型出现频次较高, 是主要的两种类型。因此, 利用该深井的水位监测统计数据进行地震的同震响应特征分析和开展地震监测是一种可行的方法。

关键词

地震, 数据统计, 水位监测, 同震响应

1. 引言

在地震孕育、发生和发展过程中, 可以观测到地下水的异常变化[1]-[9]。地下水具有流动性及不可压缩性, 所以在一定封闭条件下形成承压系统时, 它能够灵敏反映地壳 10⁻⁷-10⁻⁹ 的应变变化[10]。对大量深井的水位动态研究发现, 即使在含水层与外界完全隔绝的情况下, 地下水位也是不稳定的。而且, 水井越深、含水层的封闭性越好, 地下水位的不稳定情况越明显[11]。对水位监测的数据分析结果表明, 深井一般能够记录到由地震引起的水位振荡变化, 即对地震具有同震响应特征。因此, 深井的水位变化能够反映地震引起地壳的应力变化[12], 是一种监测地震活动的有效方法[13] [14]。

本文对山东省邹城市岳庄深井获得的水位监测数据进行了统计, 对与地震相关的同震响应特征进行了综合分析。结果表明, 岳庄深井具有良好的地震同震响应特征, 利用该深井进行地震监测是可行的, 能够为开展区域地震监测提供重要的实验数据。

2. 山东省邹城市岳庄深井的概况

2.1. 山东省邹城市地质结构概况

山东省邹城市及周边区域在大地构造分区上处于华北断块区东南部的鲁西断块内, 鲁西断块的地壳表层属典型的地台式结构, 结晶基底由太古代下部的泰山群组成, 是一套变质较深的片麻岩、片岩、变粒岩, 混合岩化强烈, 形成条带状混合岩类, 形成年代约 25 亿年。鲁西断块范围内发育有近南北向峰山断裂带、孙氏店断裂带, 近东西向鳧山断裂带及北西向苍尼断裂带等 4 条主要断裂带。峰山断裂带全长约 140 公里, 是一条区域性南北向大断裂带。依据地震地质研究结果, 峰山断裂带南段与鳧山断裂带交错, 峰山断裂带北段与苍尼断裂带交错。邹城市及周边区域地震构造图参见图 1, 以峰山断裂带为分界形成鲁中南隆起和鲁西南凹陷两个构造单元。鲁中南隆起区是由泰、沂、蒙、尼诸山为主体的长期隆起区及鲁南低山丘陵组成; 鲁西南凹陷区以凹陷平原为主, 地下埋藏丰富煤炭资源。峰山断裂带纵贯南北, 苍尼断裂带、鳧山

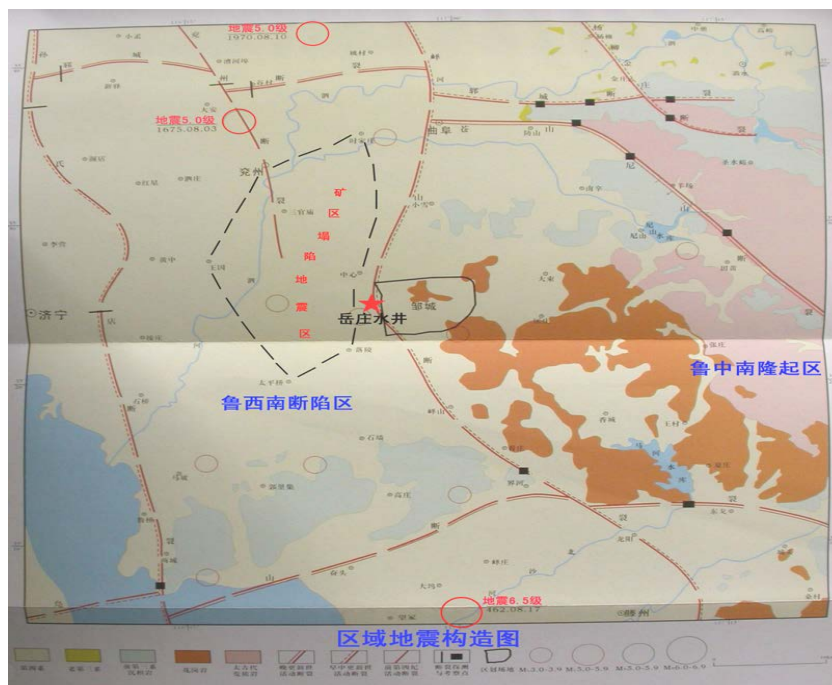


Figure 1. Seismic structural map of Zoucheng city and its surrounding area

图 1. 邹城市及周边区域地震构造图

断裂带斜跨东西，地质构造复杂，历史上多次遭受地震影响。根据近 40 年地震观测资料分析，区域地震活动频度高、震源浅，自 1970 年以来，发生 1.5 级以上地震 1900 余次，多发生在地下 15~30 公里。特别是近十几年来，鲁西南断陷区大量开采煤炭形成采空区，塌陷造成矿震急剧增多，2.5 级以上有感矿震 260 余次，矿区塌陷地震震源极浅，只有地下 500 米，频繁震动对地面影响大，有可能引发较大构造地震。峰山断裂带对鲁西南地区的地形、地貌有明显的控制作用，因而对该地区的地震活动也具有控制作用[15]。

邹城市地貌类型大体分为低山丘陵和山前倾斜平原两大类，按地形可分为低山、丘陵、平原、洼地和水面五种类型。以京沪铁路为界，以东及西南部为低山丘陵区，占总面积的 66%，海拔高度大部分在 200~300 米，山脉自东向西呈规律的展布，构成断续的低山丘陵区，地形复杂，切割强烈。以西为平原洼地，系山前倾斜平原，占总面积的 34%，海拔高度多在 40~80 米。

邹城市地下水主要分布在中心店镇、北宿镇、太平镇一带的邹西水源地和以唐村镇为中心的唐村水源地。岳庄深井位于北宿镇，主要受邹西水源地和唐村水源地的地下水影响。地下水类型为岩溶裂隙承压水。

2.2. 岳庄深井概况

岳庄深井位于邹城市北宿镇所属的经济开发区内(北纬 35°23′, 东经 116°56′), 处在峰山断裂带的支一和支二小断层间, 井深 800 米, 水位表面距地面约 40 米。峰山断裂带透水性差, 主要是由于该断裂带奥灰与十四层灰岩断层接触, 角砾岩为灰岩碎块和泥岩胶结较好造成的。井下地层由老到新简述如下: (1) 中奥陶统四段: 起止深度 701.38~800.00 米, 仅揭露 98.62 米, 未揭穿。岩性以浅灰、灰色、豹皮状灰岩、石灰岩、角砾岩组成, 夹薄层泥灰岩, 局部岩溶发育, 最大径 60 × 10 m/m, 下部含杂色泥岩与小块灰岩、胶结差、松软、错动面具粘土滑面, 786.95 米以下岩石坚硬, 含燧石块、岩芯破碎, 为断层破碎带, 未见断层点。(2) 中奥陶统五段: 起止深度 576.20~701.38 米, 厚度 125.18 米, 岩性以浅灰、灰、深灰色石灰岩、角砾质灰岩为主, 岩溶主要发育在石灰岩和裂隙面上, 岩石坚硬脆, 层面由错动现象, 中下部裂隙岩溶发育, 且多呈蜂窝状, 其径一般为 15 × 20 m/m, 最大径 30 × 35 m/m, 岩芯破碎冲洗液消耗量

大。(3) 中奥陶统六段：起止深度 468.95~576.20 米，厚度 107.25 米，岩性以灰色、浅灰、灰色厚层石灰岩、角砾状灰岩、泥灰岩为主，灰岩质纯、坚硬性脆，裂隙面被方解石充填，层面含沥清质，倾角平缓，该段裂隙岩溶发育差，冲洗液漏失量小，与上覆石炭地层呈不整合接触，因石炭系、侏罗系、第四系均为无岩芯钻进。峰山断裂带位于区域隆起与断陷的交接活动处，是特殊构造带，该深井又处于峰山断裂带的特殊构造部位，映震灵敏，是开展地震监测的有利地带。2004 年以来积累的岳庄深井水位监测数据结果表明，该水井记录的水位固体潮曲线规律性较好，对地下应力响应灵敏，且有较好的放大功能。

岳庄深井采用 SW40 型水位自动记录仪测量深井的水位变化，该水位仪具有结构简单、设计合理、同心度较高、工作稳定可靠和使用维修方便等优点[16]。其工作原理如图 2 所示。

3. 岳庄深井水位监测统计数据与地震同震响应特征分析

3.1. 岳庄深井记录地震震级、震源深度与数据分布的分析

图 3 为岳庄深井从 2011 年 1 月至 2014 年 12 月四年期间记录到的 111 次地震的震级统计图。从记录到的地震震级来看，岳庄深井对 ML4.0 震级以上地震比较敏感，其中 ML5.0 震级以上地震记录到 91 次，所占比例为 82%；而对 ML4.0 震级以下地震则几乎没有记录到结果。这说明岳庄深井对处在 ML4.0 级以上地震的同震响应特性很好，具有对破坏性地震的记震能力。

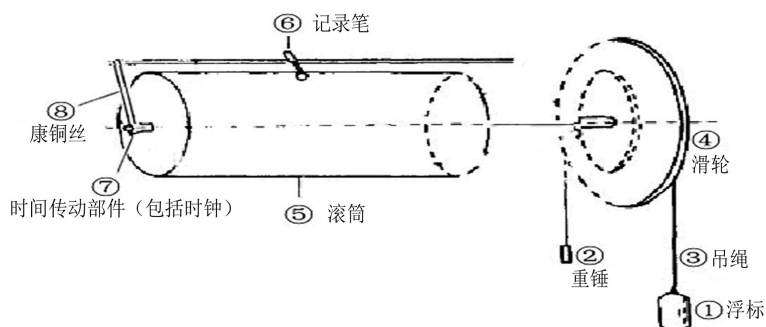


Figure 2. Working principle diagram for SW-40 mode water level monitoring instrument [16]
图 2. SW40 型水位自动记录仪工作原理图[16]

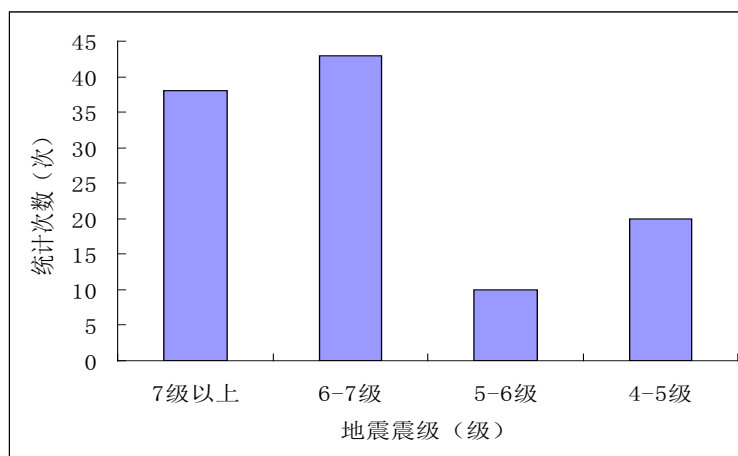


Figure 3. The magnitude of the earthquake in the 2011-2014 recorded by the deep well in Yue Zhuang
图 3. 岳庄深井 2011~2014 年记录的地震震级统计图

表1是岳庄深井从2011年1月至2014年12月四年期间按月统计ML7.0震级以上地震的发生次数,其中发生次数较多的月份依次是4月、3月、10月和11月,说明每年的3~4月和10~11月一般为强地震多发期。因此,应对每年的3~4月和10~11月地下水的水位、水温、气压和电磁等监测数据加强异常变化的观察和分析,以便为未来地震发生预警提供有利的实验依据。

震源深度小于60公里的浅震发震频率高,一般占地震总数的72.5%;因而浅震对构筑物会造成威胁。同级地震的震源越浅,则破坏力越强。图4是岳庄深井从2011年1月至2014年12月四年期间记录到的111次地震的震源深度统计图。结果表明,震源深度小于60公里的地震共记录到93次,所占比例为84%,其中震源深度小于30公里的地震记录到67次,所占比例为60%。由此说明岳庄深井对浅源性地震的反应比较灵敏,具有较好的记震能力。

单井记录地震同震的水震波通常具有方向性[17]。从图5可以看出,岳庄深井记录到的地震多发地区主要在以下三个区域,1)环太平洋地区,即从俄罗斯西伯利亚东部沿海地区、日本、我国台湾省、菲律宾到印度尼西亚这一带地区;2)青藏高原东部地区,即从我国的甘肃省、四川省到云南省与青海省、西藏自治区相接的地区;3)美洲大陆两侧与太平洋板块和大西洋板块交接地区。这说明岳庄深井记录的地震数据分布具有方向性。

3.2. 岳庄深井记录地震的同震响应特征分析

表2是岳庄深井2011~2014年间记录的地震同震响应特征统计结果。可以大致将地震同震响应特征

Table 1. The number of earthquakes of magnitude 7 or more of 2011-2014 in the deep well of Yue Zhuang

表 1. 岳庄深井 2011~2014 年统计 7 级以上地震的次数

数量	质量	排序	稿件	件数
1	3	4	7	8
2	4	3	5	9
3	7	6	7	8
2	4	3	5	9
2	4	3	5	9
2	4	3	5	9
2	4	3	5	9

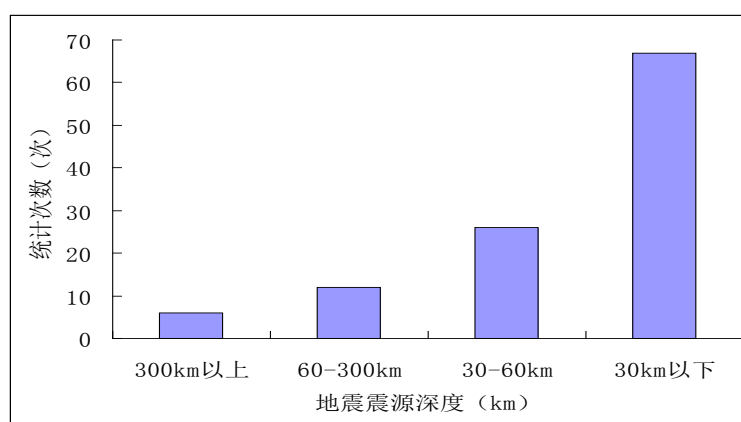


Figure 4. The focal depth of the earthquake in the 2011-2014 recorded by the deep well in Yue Zhuang

图 4. 岳庄深井 2011~2014 年记录的地震震源深度统计图

Table 2. The seismic response characteristics of in the 2011-2014 recorded by the deep well in Yue Zhuang
表 2. 岳庄深井 2011-2014 年记录的地震同震响应特征

年度同震响应特征	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	合计	占比
振荡型	9	17	7	6	39	35.1%
阶梯型	0	2	33	4	39	35.1%
L 字型	11	0	2	4	17	15.3%
直线型	0	0	7	3	10	9%
1 字型	2	0	3	1	6	5.5%
合计	22	19	52	18	111	100%

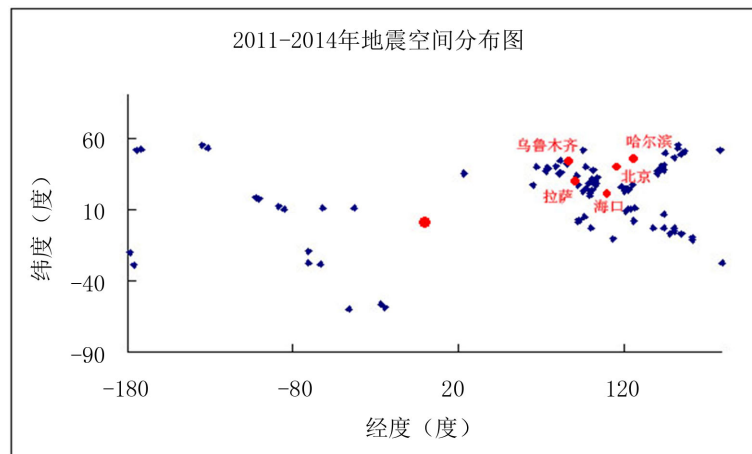


Figure 5. The spatial distribution of the earthquake in the 2011-2014 recorded by the deep well in Yue Zhuang

图 5. 岳庄深井 2011~2014 年记录的地震空间分布图

分为振荡型、阶梯型、1 字型、L 字型和直线型五种类型。其中，阶梯型(参见图 6)和振荡型(参见图 7)两种出现的频率最高，累积次数合计 78 次，所占比例为 70.2%。因而这两种类型应是主要的地震同震响应特征。其次是一字型、L 字型和 1 字型，记录到这三种类型的地震同震响应特征合计次数为 33 次，所占比例仅为 29.8%。

同震响应特征中的 1 字型是振荡型的特殊形式，它们主要是由于浅源性强地震造成。在发生振荡型(含 1 字型)的同震响应特征之前往往伴随有水位波形的突然上升或下降，短则几小时，长则几天，甚至也有长达十几天的。这种情况是否是一种地震前兆的异常现象尚需要继续观测和分析，通过确定深井水位波形的突然上升或下降与振荡型同震响应特征之间的相关性，或许可为预测地震提供一种有效识别方法。

同震响应特征中的 L 字型和直线型是阶梯型的特殊形式，它们主要是由于多次浅源性小震级地震造成。同阶梯型相比，引起 L 字型和直线型同震响应特征的地震震级一般更小，而且次数更少。在发生阶梯型(含 L 字型和直线型)的同震响应特征之前也伴随有水位波形的突然上升或下降，但发生的频率低。往往是震级较大的浅源地震才出现，并且出现的时间较短，一般几小时。

3.3. 水位监测统计数据与地震同震响应特征的相关性分析

(1) 岳庄深井记录的地震震级主要在 ML4.0 级以上，尤其是 ML5.0 级以上破坏性地震，说明岳庄深井具有较好的地震记震能力。

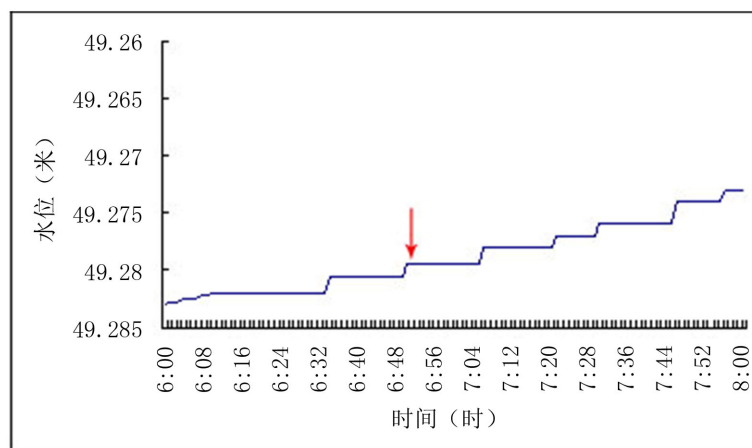


Figure 6. Water-level wave of the ML4.1 earthquake occurred on October 26, 2010 in Yuquan City, Gansu Province recorded by the deep well in Yue Zhuang

图 6. 岳庄深井 2010 年 10 月 26 日记录的甘肃省玉泉市 4.1 级地震波形图

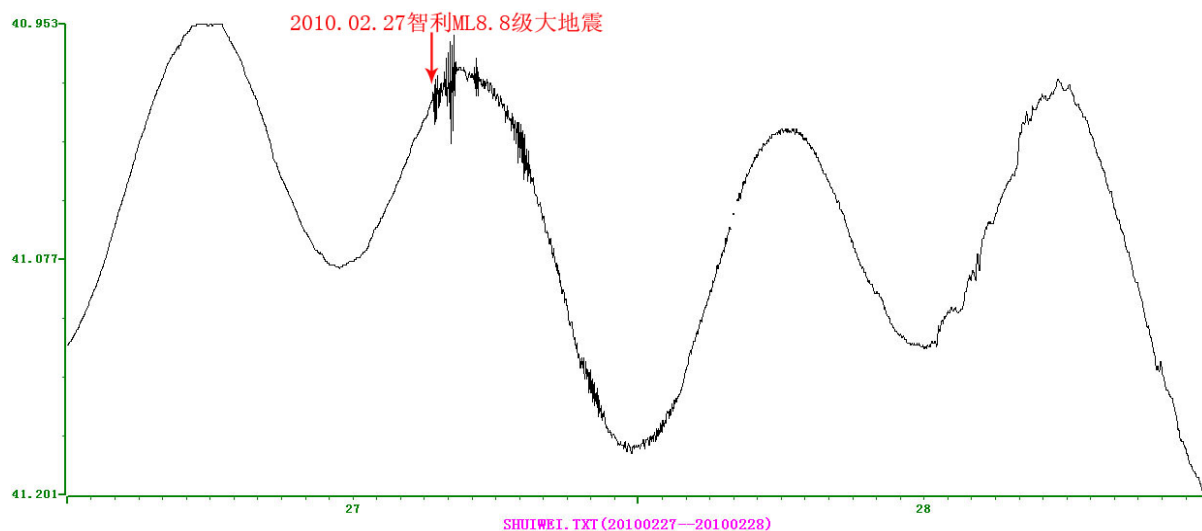


Figure 7. Water-level wave of the ML8.8 earthquake occurred on February 27, 2010 in Chile recorded the deep well in Yue Zhuang

图 7. 岳庄深井 2010 年 2 月 27 日记录的智利 ML8.8 级地震波形图

(2) 岳庄深井记录的地震发生时间分布具有集中性的特点，即每年 3~4 月和 10~11 月一般为强地震多发期。

(3) 岳庄深井记录的地震震源深度小于 60 公里的共 93 次，所占比例为 84%，高于全球发生浅源地震占地震总数的 72.5% 比率。

(4) 岳庄深井记录的地震空间范围较广，而其监测的地震数据具有方向性。

(5) 岳庄深井记录的同震响应特征主要为阶梯型(含 L 字型和直线型)和振荡型(含 1 字型)。振荡型主要是由于浅源性强地震造成的，阶梯型主要是由于多次浅源性小震级地震造成的。振荡型(含 1 字型)的同震响应特征发生之前往往伴随着水位波形的突然上升或下降的情况发生，而阶梯型(含 L 字型和直线型)的同震响应特征发生之前则很少发生，往往是震级比较大的浅源地震才会出现。因此，应当着重观测浅源性强地震，分析确定水位波形的突然上升或下降与地震的同震响应特征之间存在的因果关系，探寻两者之间存在的规律性。

综上所述,地下水作为地壳内部的一种特殊介质,对地壳应力、应变的变化有着较为灵敏的响应,深入开展深井的水位监测数据分析和研究对于认识地震活动的特征和规律具有重要的理论和实际意义[18]。因此,岳庄深井水位监测的统计数据 and 地震同震响应特征分析结果可以为地震监测提供重要的客观数据和分析依据。

4. 结论

- 1) 岳庄深井位于山东省邹城市峰山断裂带,其特殊的地质结构为灵敏记录地震的同震响应特征提供了客观条件。
- 2) 岳庄深井对浅源性强震的反应比较灵敏,具有较好的地震记震能力。
- 3) 岳庄深井的地震监测数据具有方向性,并反映每年3~4月和10~11月为强地震多发期。
- 4) 岳庄深井记录的地震同震响应特征主要有阶梯型和振荡型两种类型。
- 5) 岳庄深井水位监测数据和地震同震响应特征可以为开展地震监测提供重要的实验依据。

参考文献 (References)

- [1] Committee on the Alaska earthquake of the Division of Earth Sciences National Research Council. The Great Alaska Earthquake of 1964. Publication 1603 National Academy of Sciences, Washington DC, 1968.
- [2] 国家地震局预测预防司编. 地下流体地震预报方法[M]. 北京: 地震出版社, 1997.
- [3] 耿杰, 张昭栋, 魏焕, 等. 唐山地震前后地下水动态图像及其形成演化模式[J]. 地震地质, 1998, 20(3): 255-260.
- [4] 孙振瑜, 孙天林, 简春林. 张北 6.2 级地震前北京地下水水位井网动态异常初析[J]. 华北地震科学, 1998, 16(3): 53-61.
- [5] 林淑真, 李宗仰, 陈暉家. 台湾地区 9.21 及 3.31 地震的地下水水位异常统计与介入分析[J]. 地震地质, 2003, 26(4): 321-327.
- [6] Wang, C.-Y., Wang, C.-H. and Kuo, C.-H. (2004) Temporal Change in Groundwater Level Following the 1999 ($M_w = 7.5$) Chi-Chi Earthquake, Taiwan. *Geofluids*, 4, 210-220. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00082.x>
- [7] 李军. 雅江地震前地下水水位异常变化[J]. 四川地震, 2002(1): 27-31.
- [8] 张世民, 舒优良, 黄辅琼, 等. 甘肃玉门 5.9 级地震前周至数字化综合观测井的异常特征[J]. 华北地震科学, 2003, 21(3): 37-41.
- [9] Sato, T., Matsumoto, N., Kitagawa, Y., *et al.* (2004) Changes in Groundwater Level Associated with the 2003 Tokachi-oki Earthquake. *Earth Planets Space*, 56, 395-400. <http://dx.doi.org/10.1186/BF03353071>
- [10] 兰双双, 迟宝明. 汶川地震前地下水水位固体潮加卸载响应比异常分析[J]. 地震研究, 34(3): 271-277.
- [11] 汪成民, 等, 编著. 地下水微动态研究[M]. 北京: 地震出版社, 1988: 3.
- [12] 张凤楼, 李翠平. 白城 ZK6 井水位记震特征及记震能力的分析[J]. 东北地震研究, 1991, 7(4): 49-58.
- [13] 胡先明, 李正中, 李小梅. 深井水位记震能力用于地震预报的研究[J]. 四川地震, 1995(4): 48-54.
- [14] 胡先明. 深井水位记震能力与地震预报[J]. 大地测量与地球动力学, 2007(27): 74.
- [15] 刘兵, 吕震, 孔祥斌, 王风, 陈冲, 李木森. 岳庄深水井水位变化与地震前兆的相关性分析[J]. 北京电力高等专科学校学报(自然科学版), 2012, 29(8): 386.
- [16] 刘兵, 孔祥斌, 王风, 李木森. 深井水位地震监测数据统计分析与同震响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S1): 52.
- [17] 陈大庆, 刘耀炜. 我国在井 2 含水层系统对地震波同震响应方面的研究进展[J]. 国际地震动态, 2006(7): 28.
- [18] 刘兵, 孔祥斌, 王风, 李木森. 深井水位地震监测数据统计分析与同震响应特征[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(S1): 53.