

缪阿丽,祝涛,张艺,等. 2023. 2021年青海玛多7.4级地震的江苏流体井水位同震响应特征[J]. 地震研究,46(1):68-73,doi:10.20015/j.cnki.ISSN106-0666.2023.0006.

Miao A L, Zhu T, Zhang Y, et al. 2023. The coseismic step-rising of the groundwater level in Jiangsu caused by the Maduo $M_s7.4$ Earthquake in 2021[J]. *Journal of Seismological Research*, 46(1):68-73,doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0006.

2021年青海玛多7.4级地震的江苏 流体井水位同震响应特征*

缪阿丽^{1,2}, 祝涛¹, 张艺¹, 叶碧文¹, 王凯¹

(1. 江苏省地震局, 江苏 南京 210014; 2. 防灾科技学院, 河北 三河 065201)

摘要: 分析了2021年青海玛多7.4级地震引起的江苏流体井网水位的同震响应特征以及水位同震上升区与4.0级以上地震活动的关系。结果表明:青海玛多7.4级地震后,江苏流体井网水位出现了较大范围的同震响应,水位同震变化形态主要表现为振荡、阶升和阶降。2008年以来,4次7.0级以上大地震引起的江苏流体井网水位同震响应特征与地震活动的关系表明:水位同震响应上升区可能是区域应力集中的一种体现,它对中长期尺度中强地震的发生地点具有一定的指示意义。

关键词: 青海玛多7.4级地震;江苏流体井网;同震响应;地震预测

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2023)01-0068-06

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.0006

0 引言

地震地下流体直接参与地壳中的各种动力作用过程,是有效的中短临地震预测手段之一。研究表明,在地震前流体观测井测项会记录到前兆异常变化(付虹等,2021;付虹,赵小艳,2013;孙小龙等,2016,2018;缪阿丽等,2017,2018,2021;颜玉聪等,2022;廖丽霞等,2022),研究人员通过归纳提取地震前的异常信息,总结其在时间上和空间上的分布特征,并将结果应用于地震预测预报工作中(车用太等,1999;刘耀炜等,2000,2008,2015)。

基于地震地下流体水位对远场大震地震波的同震动态响应,一些学者试图从其变化特征分析研究同震响应异常的空间丛集区与未来地震活动

的关系,如万登堡(1995)在云南地下水动态短临指标体系研究中提出,地下水位后效异常对后续地震地点、时间,特别是地点有预报指示意义;付虹等(2002)通过分析云南省54口地下水观测井在十数年间累积的同震效应和震后效应与地震活动的关系,认为震后效应的单井、密集、条带、迁移等空间分布,可对老震区余震、外围区及井位附近牵动性后续地震地点的预报有指示意义;黄辅琼等(2000)通过分析中国大陆地下流体观测对中国台湾南投7.6级地震的同震响应特征后认为,响应异常的空间丛集区对未来地震危险区具有短期至中短期指示意义;廖丽霞等(2009)将福建流体井的同震效应时空展布特征结合福建地区同期发生的地震事件进行分析,认为震后阶跃上升变化的井水位可能包含有区域应力场信息,水位阶跃上升集中区可能是区域应

* 收稿日期: 2022-03-17.

基金项目: 中国地震局震情跟踪青年课题(2022010306)资助.

第一作者简介: 缪阿丽(1984-),高级工程师,主要从事地下流体与地震监测预报研究.

E-mail: miaoali330@126.com.

力相对集中区, 对未来该区域发生较显著的地震具有空间上的指示意义; 任宏微和张磊 (2017) 分析了2015年尼泊尔8.1级地震对我国大陆井水位动态的影响, 并在此基础上分析了水位同震响应阶变与区域应力调整的关系, 结果表明水位同震效应阶变反演得出的震时应力增强区域, 可能对未来地震危险区具有一定的指示意义; 胡小静等 (2020) 分析了云南普洱大寨井水位同震响应特征与后续中强地震的关系后认为, 井水位同震响应可作为探索区域构造和地震活动的参考指标。

江苏地区地下流体井对远场大震的响应也非常灵敏, 有学者曾就江苏地区地下流体井网对远场大震的响应特征和机理做过分析 (缪阿丽等, 2014; 郑江蓉等, 2013), 但并未对远场大震引起的井水位变化与后续地震活动的关系进行分析。2021年5月22日青海玛多发生7.4级地震, 江苏流体观测井网较多观测井出现同震响应现象。本文主要分析玛多7.4级地震后, 江苏流体观测井网水位出现的同震响应特征及其与区域后续地震活动的关系。

1 江苏流体观测井网概况

江苏流体观测井网共有27口观测井, 基本位于活动断裂带附近, 地下水类型以岩溶裂隙水和孔隙水为主。经过“九五”“十五”数字化改造后, 江苏流体观测井的观测环境、仪器设备等基本能够满足地震监测预报需求, 观测测项除水位和水温测项外, 还有气温、气压、降雨量等气象要素作为辅助测项。水位观测主要使用LN-3或LN-3A型数字水位仪, 传感器分辨率为1 mm, 采样率为1 mm。

2 井水位同震响应特征分析

2021年青海玛多7.4级地震发生后, 江苏流体观测井网有同震响应的观测井共16口 (图1), 占江苏观测井总数的59.3%, 主要分布在茅山断裂带及附近地区, 苏中和苏北也有分布。区域内

具有同震响应的流体观测井井孔基本参数及同震响应参数见表1, 其同震响应变化如图2所示。

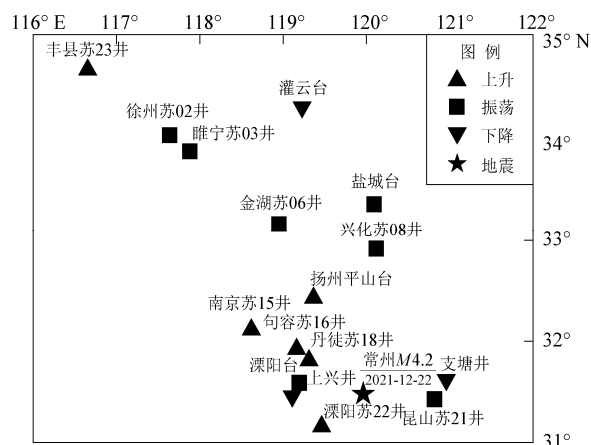


图1 江苏水位同震响应观测井分布

Fig. 1 Water-level wells in Jiangsu having coseismic response to the Maduo, Qinghai M_s 7.4 Earthquake

由表1和图2可以看出, 同一井孔不同测项、不同井孔同一测项的同震响应变化均有较大不同。水位响应形态主要有3类: ①振荡: 主要表现为快速上升、下降变化后恢复到正常动态变化值。出现这种形态的水位观测井数量最多, 共7口, 占同震响应井总数的43.8%。但不同井所表现出的振荡形态特征不同、振荡幅度有较大差异。如苏02井水位振荡的最大幅度达12.3 cm, 而支塘井水位振荡的最大幅度仅为0.4 cm。②先振荡后上升: 主要表现为地震发生后水位先发生振荡, 在振荡结束后并未回落到正常动态变化值, 而是出现阶跃上升变化。如苏22井在震后7 min后发生振荡变化, 振荡持续时间58 min, 在振荡过程中出现阶跃上升, 回到正常动态值后出现阶跃上升变化, 上升幅度为7 cm, 之后在新的基值上继续波动变化。出现这种形态的流体观测井较多, 共6口, 占同震响应井总数的37.5%。③阶降: 主要表现为地震发生后水位出现阶降变化, 且下降后并未恢复到原先动态变化值, 而是在新的基值上继续波动。如溧阳台井水位在震后出现下降台阶变化, 下降幅度为9.1 cm, 下降变化结束后在新的观测值上波动。

表 1 水位同震响应观测井的基本参数及同震响应参数
Tab. 1 Basic parameters and coseismic variation parameters of the water-level wells
in Jiangsu during the Maduo, Qinghai $M_s7.4$ Earthquake

序号	台站	基本参数				同震响应参数				
		构造部位	观测层岩性	套管深度/m	井深/m	地下水类型	观测分量	变化幅度	变化形态	震中距/km
1	睢宁苏 02 井	郯庐断裂带西侧约 35 km	灰岩	141.4	283.6	岩溶裂隙承压水	静水位	13.3 cm	振荡	1 780
2	睢宁苏 03 井	郯庐断裂带西侧约 15 km	灰岩	95.9	416.0	岩溶裂隙承压水	静水位	1.9 cm	振荡	1 800
3	盐城台	盐城断裂	粉砂	542	546	孔隙承压水	静水位	0.7 cm	振荡	2 010
4	金湖苏 06 井	金湖凹陷刘庄构造兴隆极高点	灰岩	2 008.5	2 364.5	岩溶裂隙承压水	静水位	1.2 cm	振荡	1 910
5	兴化苏 08 井	溱潼凹陷, 戴窑构造	白云岩、灰岩	2 228	2 680.4	孔隙承压水	静水位	0.7 cm	振荡	2 030
6	句容苏 16 井	茅山断裂西侧, 句容凹陷 潜山隆起近顶部	砂岩、含砾砂岩	20	889.2	孔隙承压水	动水位	0.6 cm	上升	1 960
7	扬州平山台	扬州江都断裂	砂岩	416	416	碎屑岩类裂隙水	静水位	3.1 cm	上升	1 960
8	溧阳台	茅山断裂带	细砂	862	1 132	碎屑岩类裂隙水	静水位	9.1 cm	下降	1 970
9	丹徒苏 18 井	宁镇反射弧茅山脊柱北端, 茅山 断裂带茅东断裂西侧	灰岩	75.1	366.8	岩溶裂隙水	动水位	0.9 cm	上升	1 970
10	昆山苏 21 井	EW 向苏州—昆山断裂带附近	大理岩	313	677.0	断层裂隙水	静水位	3.8 cm	振荡	2 130
11	溧阳苏 22 井	宜溧山区东西向背斜轴部附近	砂岩	26	243.8	裂隙承压水	动水位	7 cm	振荡 上升	2 010
12	南京苏 15 井	淮阳山字形构造体系前弧东翼与 宁镇反射弧西翼的交接部位	砂岩	55	736	裂隙承压水	静水位	0.6 cm	上升	1 910
13	支塘	—	泥岩	—	544	裂隙承压水	静水位	0.4 cm	下降	2 130
14	丰县苏 23 井	封邱断裂凹陷区内	角砾岩	268	603	碎屑岩类裂隙水	静水位	3.6 cm	阶升	1 680
15	上兴井	茅山断裂带	砂质泥岩	229	354	碎屑岩类裂隙水	静水位	1.2 cm	振荡	1 970
16	灌云台	淮阴—响水口断裂	变质岩	268	283	基岩裂隙水	静水位	1.2 cm	下降	1 910

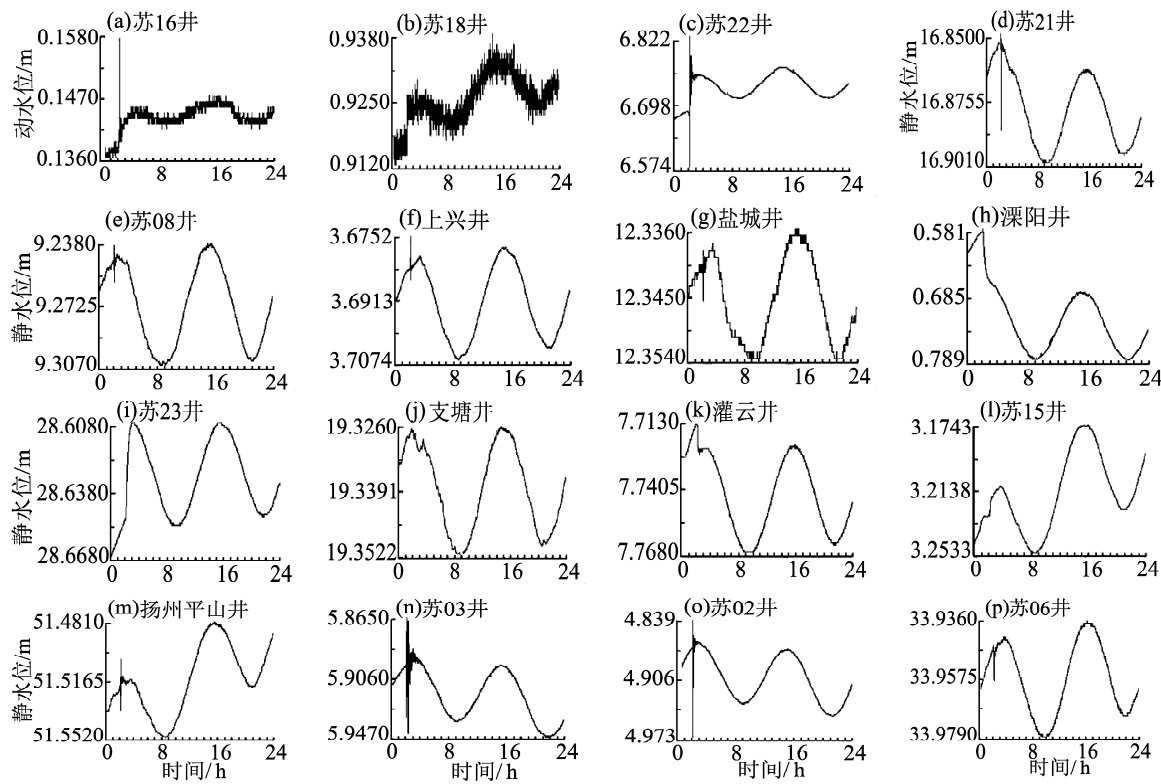


图 2 江苏水位观测井同震响应变化形态

Fig. 2 Coseismic variations of the water level in the 16 wells in Jiangsu caused by the Maduo $M_s7.4$ Earthquake

3 水位同震上升区与历史地震关系

青海玛多7.4级地震引起的江苏流体观测井水位同震响应在形态上虽然呈多样性,但在空间分布上却表现出一定的规律特征,即水位同震上升的6口水位井,除苏23井分布在江苏北部,其余5口井均分布在茅山断裂带及其附近地区。2021年12月22日常州发生4.2级地震,该地震震中位于水位同震上升区域附近(图1)。

2008年以来,引起江苏流体观测井网较大范围产生同震响应的大地震有2008年5月12日四川汶川8.0级地震、2011年3月11日日本9.0级地震、2012年4月11日印尼苏门答腊8.6级地震以及2013年4月20日四川芦山7.0级地震。这4次远场大地震引起的江苏流体观测井网水位同震响应形态及空间分布如图3所示,图中数据引自缪阿丽等(2014)。由图可知,这4次大地震引

起的水位同震响应形态以震荡和下降为主,偶有零星水位井出现水位同震上升现象。分析区域地震活动情况可知,2011年日本9.0级地震后,在茅山断裂带及附近地区有3口流体井水位出现同震上升,之后2012年7月20日高邮发生4.9级地震,该地震位于表现为水位同震上升的流体井区域长轴延长线上,震中距离水位同震上升区最北边的苏16井138 km(图3b)。而其余3次大地震发生后,江苏地区并未发生4.0级以上地震。比较这几次大地震后江苏流体观测井网同震响应的不同特征可知,玛多7.4级地震和日本9.0级地震后,形成的水位同震阶升数量较多,且范围较集中,特别是玛多7.4级地震后,在茅山断裂带及附近地区多口流体井出现水位同震上升的现象很少见。这说明,大地震发生后,形成一定规模的水位同震上升区域可能在一定程度上体现了区域应力的一种状态,它对中长期尺度的中强地震的发生地点有一定指示意义。

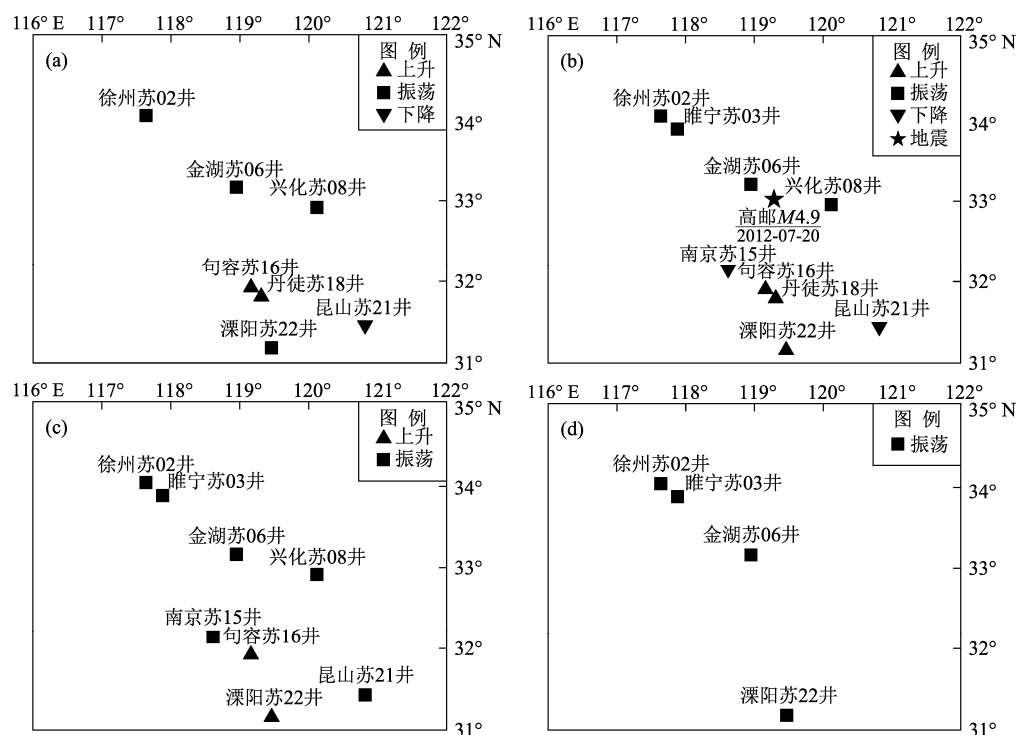


图3 2008年汶川8.0级地震(a)、2011年日本9.0级地震(b)、2012年印尼苏门答腊8.6级地震(c)及2013年芦山7.0级地震(d)引起的江苏流体观测井网水位同震变化空间分布

Fig. 3 Observation wells having coseismic response in water level to the 2008 Wenchuan $M_s8.0$ Earthquake (a), the 2011 Earthquake of the Pacific coast of Tohoku (b), the 2012 Sumatra, Indonesia $M_s8.6$ Earthquake (c), and the 2013 Lushan $M_s7.0$ Earthquake (d)

4 讨论

2021 年青海玛多 7.4 级地震引起的江苏流体观测井网水位同震响应形态在空间分布上具有一定特征, 出现水位同震上升的流体井主要分布于茅山断裂带及附近地区, 之后 2021 年 12 月 22 日发生了常州 4.2 级地震。单个井孔水位阶升是由井水流量增大所致, 井水流量的增大可能是由深部来水、也可能是由远场地震引起含水层渗透率增大 (Brodsky *et al.*, 2003; 孙仁远, 成国祥, 2004) 导致含水层中水体进入井孔的流速增大从而引起水位值的升高。除此之外, 井孔所处区域的构造背景也非常重要。水位动态的物理意义比较明显, 当含水层受压时, 井水位表现为上升; 相反, 井水位则表现为下降。因此震后阶跃上升的观测井水位可能包含有区域应力场的信息。单个井孔水位同震形态可能因为诸多因素, 如井孔岩性、套管深度等影响, 而不能完全包含其所处区域的应力场信息。如果远场大震引起某个区域内应力调整变化比较明显, 且表现出一定的群体性或集中性异常, 那么其可能是区域应力相对集中的表现 (任宏微, 张磊, 2017; 廖丽霞等, 2009), 这些地区对未来地震发生地点具有一定指示意义。

图 1 和 3 显示, 在几次 7.0 级以上大地震的影响下, 苏 16 井和苏 18 井水位多次出现同震上升现象, 但之后并非均对应地震。这两口井均为自流井, 观测岩性相同 (均以砂岩为主)、套管深度均较浅 (苏 18 井套管下至 75 m, 苏 16 井下至 20 m), 都位于茅山断裂带附近, 其观测含水层岩性、井孔结构和所处构造决定了其对含水层结构的变化比较敏锐。但同震应力变化能否对区域内的强震活动产生显著影响主要取决于断层的绝对应力是否已临近失稳强度 (马胜利等, 2011), 或者说, 如果区域应力未达到一定程度, 远场大震引起的水位同震阶升井的范围将局限或分散, 而如果出现较大面积的同震水位阶升, 那么可能一定程度上能够反映区域应力状态, 而同震水位阶升集中地区对未来中强地震发生地点具有一定指示意义。因此, 尽管在几次大地震的影响下, 苏 16 井和苏 18 井多次出现同震上升现象, 但只有与其它多口井同时出现水位同震上升现象时, 之后才

会对应中强地震。这进一步说明, 只有出现群体性水位同震阶升现象, 水位同震阶升集中区域对未来地震发生地点才具有一定指示意义。

5 结论

本文通过研究 2021 年青海玛多 7.4 级地震后, 江苏流体观测井水位出现的同震响应特征及其与区域后续地震活动的关系, 得出以下主要结论:

(1) 共有 16 口观测井水位出现同震响应, 其变化形态主要表现为振荡、阶升和阶降。

(2) 同震响应形态在空间分布上具有一定特征, 5 口水位同震上升的流体井主要分布于茅山断裂带及附近地区, 之后发生了常州 4.2 级地震。

(3) 综合分析几次历史大地震与江苏流体井网同震响应特征关系, 认为水位同震响应上升区可能是区域应力集中的一种体现, 它对中长期尺度中强地震的发生地点具有一定的指示意义。

感谢云南省地震局付虹研究员对本文的指导!

参考文献:

- 车用太, 鱼金子, 刘五洲, 等. 1999. 华北北部地区 3 次强震前地下流体异常场及其形成与演化机理 [J]. 中国地震, 15 (2): 139 - 150.
- 付虹, 刘丽芳, 王世芹, 等. 2002. 地方震及近震地下水同震震后效应研究 [J]. 地震, 22 (4): 55 - 66.
- 付虹, 刘自凤, 胡小静, 等. 2021. 2021 年云南漾濞 $M_s 6.4$ 地震异常跟踪分析 [J]. 地震研究, 44 (3): 301 - 308.
- 付虹, 赵小艳. 2013. 汶川 $M_s 8.0$ 地震前云南地区显著前兆观测异常分析 [J]. 地震学报, 35 (4): 477 - 484.
- 胡小静, 付虹, 李涛, 等. 2020. 云南普洱大寨井水位同震响应研究及预测意义 [J]. 地震研究, 43 (2): 340 - 347.
- 黄辅琼, 迟恭财, 徐桂明, 等. 2000. 大陆地下流体对台湾南投 7.6 级地震的响应研究 [J]. 地震, 20 (增刊 1): 119 - 125.
- 廖丽霞, 林稚颖, 莫佩婵, 等. 2022. 粤桂琼流体台网对区域中强地震的映震能力分析 [J]. 地震研究, 45 (2): 290 - 299.
- 廖丽霞, 王玫玲, 吴绍祖. 2009. 福建省流体台网井水位的同震效应及其地震预测意义 [J]. 地震学报, 31 (4): 432 - 441.
- 刘耀炜, 任宏微, 张磊, 等. 2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析 [J]. 地震地质, 37 (1): 307 - 318.
- 刘耀炜, 施锦. 2000. 强震地下流体前兆信息特征 [J]. 地震学报, 22 (1): 102 - 107.
- 刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 等. 2008. 井孔水温异常与 2007 年宁洱 6.4 级地震关系分析 [J]. 地震研究, 31 (4): 347 - 353.

- 马胜利, 缪阿丽, 黄元敏. 2011. 应力扰动对断层摩擦声发射活动影响的实验研究[J]. 西北地震学报, 33(1): 1–9.
- 缪阿丽, 李锋, 王俊, 等. 2021. 2018年安徽无为 $M_L 4.1$ 地震地下流体异常特征[J]. 地震, 41(4): 192–202.
- 缪阿丽, 王俊, 叶碧文, 等. 2017. 安庆 $M_S 4.8$ 级地震前地下流体典型异常特征分析及其前兆机理讨论[J]. 地震, 37(3): 180–189.
- 缪阿丽, 叶碧文, 张艺, 等. 2018. 苏皖地区2次中强地震前地下流体异常及其形成机理分析[J]. 中国地震, 34(2): 350–363.
- 缪阿丽, 张艺, 叶碧文, 等. 2014. 江苏井网水温水位对几次大地震的同震响应特征及机理分析[J]. 地震, 34(4): 78–87.
- 任宏微, 张磊. 2017. 尼泊尔 $M_W 8.1$ 地震对我国大陆井水位动态的影响及其地震预测意义[J]. 大地测量与地球动力学, 37(10): 1087–1091.
- 孙仁远, 成国祥. 2004. 人工振动对多孔介质中液体流动的影响[J]. 水动力学研究与进展, 19(4): 552–557.
- 孙小龙, 王俊, 向阳, 等. 2016. 基于《中国震例》的地下流体异常特征统计分析[J]. 地震, 36(4): 120–130.
- 孙小龙, 向阳, 杨朋涛. 2018. 云南会泽井水位地震预测效能检验及其机理分析[J]. 地震学报, 40(2): 185–194.
- 万登堡. 1995. 云南地下水动态短临指标体系研究[J]. 地震研究, 18(3): 291.
- 颜玉聪, 周晓成, 朱成英, 等. 2022. 2020年新疆伽师 $M_S 6.4$ 地震前后伽师地区温泉水文地球化学特征[J]. 地震研究, 45(2): 229–240.
- 郑江蓉, 杨从杰, 江吴琳. 2013. 江苏流体井网对汶川和日本地震的同震响应特征研究[J]. 地震研究, 36(1): 34–41.
- Brodsky E E, Roeloffs E A, Woodcock D, et al. 2003. A mechanism for sustained groundwater pressure changes induced by distant earthquakes[J]. J Geophys Res, 108(B8): 2390.

The Coseismic Step-rising of the Groundwater Level in Jiangsu Caused by the Maduo $M_S 7.4$ Earthquake in 2021

MIAO Ali^{1,2}, ZHU Tao¹, ZHANG Yi¹, YE Biwen¹, WANG Kai¹

(1. Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, Jiangsu, China)

(2. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China)

Abstract

This paper firstly analyzed the characteristics of the coseismic response of the water level in the observational network of wells in Jiangsu caused by the 2021 Maduo $M_S 7.4$ Earthquake, then analyzed the activity of the $M_S \geq 4.0$ earthquakes in the area which the water level had the coseismic step-rising. In a wide range area in Jiangsu, the water level had a coseismic response during the Maduo 7.4 Earthquake; the coseismic variation of the water level was featured as oscillating, step-rising and step-falling. The coseismic step-rising of the water level may indicate the regional stress concentration, which suggested the possible location of the medium- and strong-earthquakes in the medium- and long-period.

Keywords: the Maduo, Qinghai $M_S 7.4$ Earthquake; the observational network of wells in Jiangsu; coseismic response; earthquake prediction