



德宏法帕井静水位质量及同震响应分析

番绍辉, 王金霞, 钟开荣, 周克鹏, 吴元辉

Quality and co-seismic response analysis of static water level in Dehongfapa well

Fan Shaohui, Wang Jinxia, Zhong Kairong, Zhou Kepeng, and Wu Yuanhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2024-128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

江苏地下流体对青海玛多M7.4地震的同震响应分析

Analysis on co-seismic response of underground fluids in Jiangsu related to Qinghai Maduo M7.4 earthquake

地震科学进展. 2023, 53(9): 393–402

云南井网水温和水位对几次典型地震的响应特征研究

Coseismic response characteristics of groundwater temperature and level of Yunnan well network to several earthquakes

地震科学进展. 2024, 54(5): 316–330

承德地区宽频带倾斜仪与宽频带地震计同震响应融合分析

Fusion analysis of co-seismic response between broadband tiltmeters and broadband seismometers in Chengde area

地震科学进展. 2025, 55(1): 21–29

五指山台DSQ水管倾斜仪和VP垂直摆观测数据质量对比分析

Analysis on the observation data of DSQ water pipe inclinometer and VP vertical pendulum in Wuzhishan Station, Hainan Province

地震科学进展. 2022, 52(5): 232–237

江西省赣州地震中心站DSQ型水管倾斜仪与VS型垂直摆倾斜仪同震响应对比分析

Comparative analysis of observation data between DSQ water-tube tiltmeter and VS vertical pendulum tiltmeter at Ganzhou seismic center station in Jiangxi

地震科学进展. 2023, 53(9): 409–415

基于永安地震台的井水位校测装置的设计与实现

Design and realization of calibration device for ground-water-level at Yongan seismic station

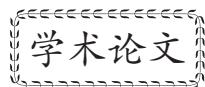
地震科学进展. 2020, 50(5): 7–11



关注微信公众号，获得更多资讯信息

番绍辉, 王金霞, 钟开荣, 等. 德宏法帕井静水位质量及同震响应分析 [J]. 地震科学进展, 2025, 55(9): 535-542. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-128

Fan S H, Wang J X, Zhong K R, et al. Quality and co-seismic response analysis of static water level in Dehongfapa well[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2025, 55(9): 535-542. doi:10.19987/j.dzqxjz.2024-128



德宏法帕井静水位质量及同震响应分析

番绍辉^{1)*} 王金霞²⁾ 钟开荣²⁾ 周克鹏¹⁾ 吴元辉¹⁾

1) 云南省地震局, 云南昆明 650224

2) 德宏州防震减灾局, 云南芒市 678400

摘要 以德宏法帕井静水位观测数据及所记录到的同震响应事件为研究对象, 系统分析德宏法帕井静水位观测数据运行情况、潮汐因子、观测精度及同震响应特征。结果表明: 德宏法帕井静水位固体潮日变形态清晰, 变化形态表现出较为明显的日波和半日波, 潮汐响应能力较强, 观测资料精度较高; 该井对大震具有较强的响应能力, 德宏法帕井静水位对不同地震表现出不同的同震响应形态, 主要以震荡型为主; 该井水位的同震响应变化幅度一般与井震距成负相关, 与震级成正相关; 同震响应时间与井震距成正相关。最后综合分析了前人对水位同震响应特征的机理研究, 并结合德宏法帕井具体情况对其相关机理进行初步探讨。

关键词 静水位; 观测精度; 同震响应; 机理

中图分类号: P315.63 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2025)09-0535-08

doi: 10.19987/j.dzqxjz.2024-128

Quality and co-seismic response analysis of static water level in Dehongfapa well

Fan Shaohui¹⁾, Wang Jinxia²⁾, Zhong Kairong²⁾, Zhou Kepeng¹⁾, Wu Yuanhui¹⁾

1) Yunnan Earthquake Agency, Yunnan Kunming 650224, China

2) Dehong Prefecture Earthquake Prevention and Disaster Reduction Bureau, Yunnan Mangshi 678400, China

Abstract Using static water level observation data from Dehongfapa well and recorded co-seismic response events as the research objects, the operation, tidal factor, observation accuracy, and co-seismic response characteristics of the static water level observation data of Dehongfapa well were systematically analyzed. The results showed clear diurnal variations in the solid tide affecting the Dehongfapa well static water level, and the variation pattern showed obvious daily and semi-daily waves, the observational data were highly accurate and a strong tidal response ability was noted. The well exhibited a strong response to large earthquakes, and the static water level showed different co-seismic response patterns for different earthquakes, mainly in the form of oscillations. The variation range of the co-seismic response of the well water level was generally negatively correlated with the well-seismic distance and positively correlated with the

收稿日期: 2024-08-15; 采用日期: 2024-11-28。

基金项目: 云南省地震局资助。

* 通信作者: 番绍辉(1993-), 男, 工程师, 主要从事地球物理观测与分析等研究。E-mail: 250336803@qq.com。



magnitude, and the co-seismic response time was positively correlated with the well-seismic distance. Finally, the mechanism of the co-seismic response characteristics of the water level was comprehensively analyzed, and the related mechanism was preliminarily discussed in combination with the specific situation of Dehongfapa well.

Keywords static water level; measurement accuracy; co-seismic response; mechanism

0 引言

地震作为一种地球内部能量的剧烈释放过程,不仅会在地表造成显著的破坏,还会对地下水资源产生即时且显著的影响,其中水位同震响应便是一个典型的现象。水位同震响应指的是在地震发生的瞬间或短时间内,地下水位出现明显的升降变化。井水位同震响应是揭示地壳介质对应力-应变过程响应最有效和直接的手段之一^[1]。同震响应能够有效揭示孔隙压和周围介质应变的变化特征,反映介质的应力-应变过程^[2],其现象包含着一定的前兆信息,能够在一定程度上反映出地震发生及震后调整过程^[3]。因此加强静水位数据内在质量及同震响应的特征研究,有助于为德宏法帕井水位观测资料效能评估等提供参考依据^[4],还有助于揭示地震的发生机制,对促进地震预测研究具有重要意义。

本文选取2012—2023年德宏法帕井静水位数据,分析该井静水位观测数据固体潮变化形态、完整率、潮汐因子、观测精度,依此来检验德宏法帕井静水位数据的观测精度及内在质量,系统分析2012—2023年间德宏法帕井静水位对全球 $M_s7.0$ 及以上地震的数据变化特征及同震响应能力。

1 德宏法帕井概况

云南省德宏州防震减灾局法帕观测站位于德宏州芒市南部7 km的法帕村村西300 m处,交通便利,供水、供电正常,观测井房占地110 m²;观测井地理坐标(24.39°N, 98.55°E),高程为882 m。从区域构造环境(图1)看,德宏法帕井地处云南西部、高黎贡山南麓,位于龙陵—畹町断裂北部、龙陵—瑞丽大断裂东南部,南为畹町大断裂,东为怒江大断裂,西为恩梅开江断裂。

德宏法帕井于1985年5月1日由云南省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程大队204井队钻探成井,完钻井深200.17 m,现有井深200.17 m,成井后井水位状态常年为静水位,地质特征为中厚层状泥灰岩,含承压岩溶水。井水位埋深约2.15 m,顶板厚度24.26 m,其岩性为粉砂质泥岩,属弱含水层。

套管下至95.57 m,用粘土进行填埋,含水层具有封闭性和承压性,止水好。地下水接受侧向和上层第四系空隙水越流补给。观测井水化学类型属于碳酸盐类岩溶水。德宏法帕井于2006年11月进行数字化观测,观测仪器为数字化静水位观测仪器LN-3A,后因仪器老化严重、故障率高,于2019年10月10日更换为SWY-II型数字化水位仪,次日启用该新仪器进行观测。

2 数据质量分析

2.1 数据运行评价

德宏法帕井静水位2006年11月开始采用LN-3A型数字式水位仪进行观测,后因仪器老化,2019年10月11日开始采用SWY-II型数字化水位仪进行观测,两套观测仪器分辨率都较高,采样率1次/min,仪器运行稳定。近十几年的观测数据表明,德宏法帕井静水位固体潮日变形态清晰,日变规律较为明显,变化形态表现为较为明显的日波和半日波,气压效应较为明显,与大气压呈正相关。图2为2023年3月1—10日的静水位曲线图。

车用太等^[5]指出观测数据连续率、完整率是衡量台站运行状况的综合指标,其高低取决于仪器设备的故障率、仪器设备运行环境的优劣及台网管理水平。通过中国地震前兆台网处理系统软件,德宏法帕井静水位2012—2023年观测数据平均连续率、完整率均为95%以上(表1),除2012年和2014年因数采故障造成缺数较多外,其余年份连续率、完整率均较高。依据地下流体观测资料质量的评定指标,德宏法帕井静水位连续率、完整率均达到规范要求,该井仪器运行稳定,数据有效率较高。

2.2 数据潮汐因子及观测精度

地下水位随潮汐引力的变化而发生变化,能够明显地体现地球固体潮效应。井孔水位固体潮效应是地壳岩体应变固体潮的次生效应,是由含水层体积变形引起的井水位有规律的周期性变化^[6]。应用Venedikov调和分析方法,按年对德宏法帕井静水位的整点值进行调和分析,计算出德宏法帕井静水位的 M_2 波潮汐因子(表2),其中,该井观测精度为

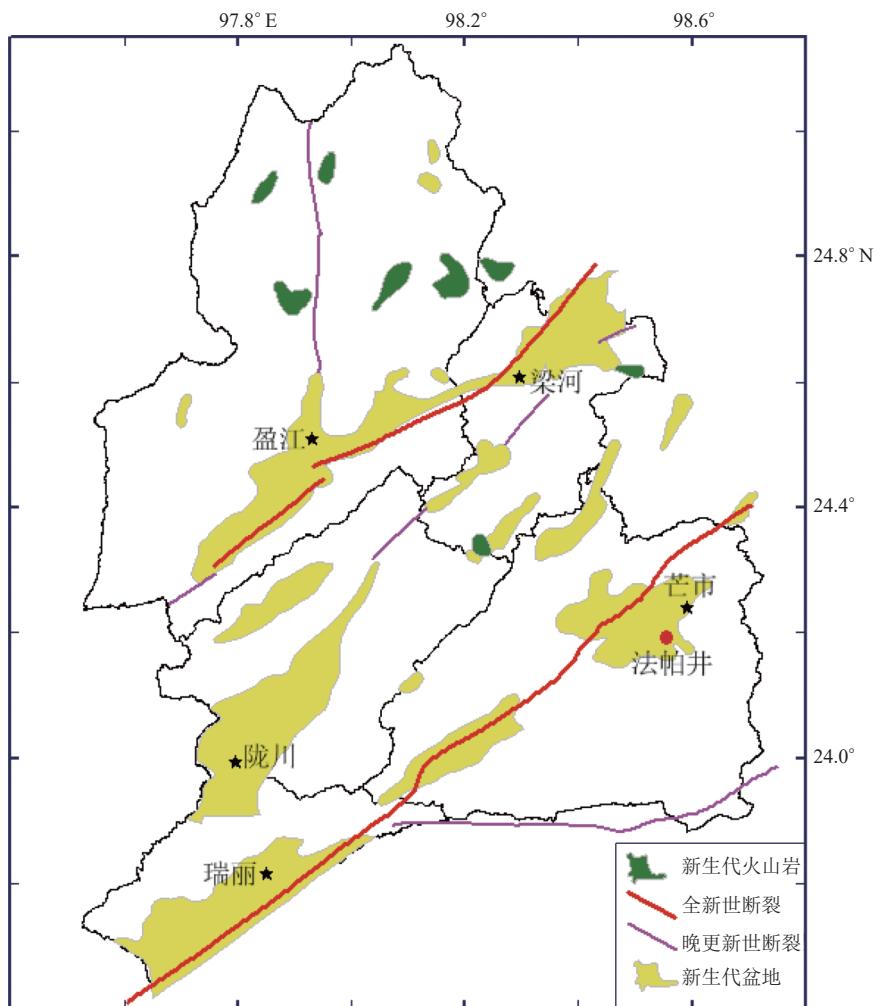


图1 德宏法帕井地质构造图
Fig. 1 Geological structure map of Dehongfapa well

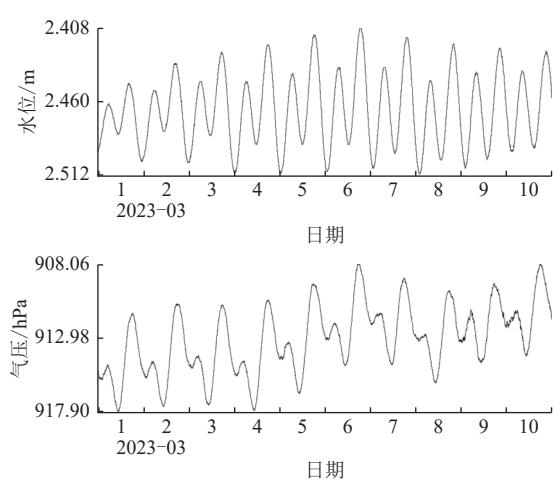


图2 德宏法帕井静水位曲线图
Fig. 2 Static water level curve of Dehongfapa well

中误差和潮汐因子的比,比值越小,表明观测精度越高,反之则表明观测精度较低,它是地下流体资料评比中作为评价水位观测资料内在质量状况的主要指

表1 德宏法帕井静水位2012—2023年数据质量

Table 1 Data quality of static water level of Dehongfapa well from 2012 to 2023

年份	连续率/%	完整率/%
2012	81.29	79.67
2013	100.00	99.98
2014	90.11	88.78
2015	99.98	99.98
2016	99.83	99.83
2017	98.71	98.16
2018	97.07	97.07
2019	99.68	99.19
2020	97.10	96.76
2021	99.96	99.96
2022	100.00	100.00
2023	99.92	99.92

表 2 德宏法帕井静水位 2012—2023 年数据年均值表
Table 2 Annual mean value table of static water level data in Dehongfapa well from 2012 to 2023

年份	潮汐因子/ 10^{-9} mm	中误差	观测精度
2012	1.555 95	0.005 17	0.003 32
2013	1.560 74	0.004 67	0.002 99
2014	1.566 84	0.004 55	0.002 90
2015	1.565 71	0.004 03	0.002 57
2016	1.553 61	0.004 84	0.003 12
2017	1.555 41	0.003 90	0.002 51
2018	1.559 04	0.004 93	0.003 16
2019	1.558 97	0.005 21	0.003 34
2020	1.523 81	0.013 33	0.008 75
2021	1.534 97	0.005 58	0.003 64
2022	1.531 25	0.006 72	0.004 39
2023	1.528 26	0.007 03	0.004 60
年均值	1.554 95	0.005 83	0.003 77

标之一。根据表 2 可以看出, 德宏法帕井静水位潮汐因子 2012—2023 年年均值在 1.55×10^{-9} mm 附近, 均大于 1×10^{-9} mm, 符合地下流体评价要求; 观测精度平均值为 0.003 77, 均小于 0.01。由此表明德宏法帕井静水位潮汐响应能力较强, 观测数据内在质量较

高, 观测资料精度相对较高。

3 同震响应特征分析

本次研究选取 2012—2023 年德宏法帕井静水位分钟值数据资料, 地震目录取自中国地震台网目录。选取 2012—2023 年间在全球发生的 $M_S \geq 7.0$ 及以上的 169 次地震, 德宏法帕井静水位有同震响应的地震为 140 次, 总响应比 82.8%。其中 $M_S \sim 7.4$ 地震 117 次, 有同震响应的地震为 82 次, 同震响应比为 70.1%; $M_S \sim 7.9$ 地震 43 次, 有同震响应的地震为 41 次, 1 次地震未有同震响应, 1 次因断电造成数据缺数无同震响应, 同震响应比为 95.3%; $M_S \geq 8.0$ 及以上地震 9 次, 有同震响应的地震为 9 次, 同震响应比为 100%。由此可知, 随着震级的增大, 德宏法帕井静水位同震响应比逐渐增高, $M_S \geq 8.0$ 及以上地震德宏法帕井静水位均能记录到同震响应。因文章篇幅有限, 本文仅给出全球 $M_S \geq 7.5$ 及以上地震同震响应特征参数, $M_S \geq 7.5$ 及以上地震同震响应占比约为 96.2%, 记录到井震距为 1298~18 777 km, 水位响应幅度为 0.001~0.643 m, 水位同震响应参数如表 3 所示。

3.1 德宏法帕井静水位同震响应变化特征

地震波引起的水位同震变化类型有多种。付虹

表 3 德宏法帕井静水位同震响应参数

Table 3 Coseismic response parameters of static water level in Dehongfapa well

序号	发震时刻	北纬/°	东经/°	发震地点	M_S	井震距/km	响应时间/min	水位变幅/m	响应形态
1	2023-12-02 22:37:06	8.65	126.45	菲律宾棉兰老岛海域	7.6	3 437	10	0.035	震荡
2	2023-05-19 10:57:02	-23.10	170.70	洛亚蒂群岛	7.7	9 399	28	0.011	震荡
3	2023-05-11 00:02:01	-15.50	-174.50	汤加群岛	7.5	10 409	29	0.007	震荡
4	2023-02-06 18:24:50	38.00	37.15	土耳其	7.8	5 923	14	0.028	震荡
5	2023-02-06 09:17:37	37.15	36.95	土耳其	7.8	5 947	23	0.038	震荡
6	2023-01-10 01:47:33	-7.20	130.10	印尼班达海	7.6	4 901	13	0.02	震荡
7	2022-09-20 02:05:08	18.30	-103.20	墨西哥	7.5	14 708	42	0.011	震荡
8	2022-09-11 07:46:59	-6.30	146.55	巴布亚新几内亚	7.6	6 215	14	0.005	震荡
9	2021-12-30 02:25:52	-7.75	127.60	班达海	7.5	4 762	14	0.01	震荡
10	2021-08-13 02:32:50	-57.21	-24.81	南桑威奇群岛	7.6	14 249	30	0.006	震荡
11	2021-07-29 14:15:46	55.40	-158.00	美国阿拉斯加州海域	8.1	8 593	18	0.028	震荡
12	2021-03-05 03:28:32	-29.51	-177.04	新西兰克马德克群岛	7.8	10 809	32	0.018	震荡
13	2020-10-20 04:54:40	54.74	-159.75	美国阿拉斯加州海域	7.5	8 521	18	0.015	震荡
14	2020-07-22 14:12:41	55.05	-158.50	美国阿拉斯加州海域	7.8	8 580	20	0.017	震荡
15	2020-03-25 10:49:19	48.93	157.74	千岛群岛	7.5	5 762	6	0.033	震荡
16	2019-05-26 15:41:12	-5.85	-75.18	秘鲁北部	7.8	17 839	43	0.016	震荡
17	2019-05-14 20:58:28	-4.15	152.52	新不列颠岛地区	7.6	6 636	9	0.018	震荡

续表3

序号	发震时刻	北纬/°	东经/°	发震地点	M_S	井震距/km	响应时间/min	水位变幅/m	响应形态
18	2019-02-22 18:17:21	-2.15	-76.91	厄瓜多尔	7.5	17487	43	0.009	震荡
19	2018-02-26 01:44:42	-6.19	142.77	巴布亚新几内亚	7.5	5870	17	0.029	震荡
20	2018-01-23 17:31:41	55.96	-149.13	阿拉斯加湾	8	9053	23	0.030	震荡
21	2018-01-10 10:51:29	17.43	-83.51	洪都拉斯北部海域	7.6	15353	48	0.026	震荡
22	2017-11-13 02:18:19	34.90	45.75	伊拉克	7.8	5172	9	0.037	震荡
23	2017-09-08 12:49:15	15.05	-93.90	墨西哥沿岸近海	8.2	15419	41	0.112	震荡
24	2017-07-18 07:34:13	54.36	168.95	科曼多尔群岛	7.8	6568	19	0.066	震荡
25	2017-01-22 12:30:25	-6.19	155.14	所罗门群岛	7.9	7002	20	0.054	震荡
26	2016-12-25 22:22:27	-43.38	-73.81	智利	7.6	17783	55	0.013	震荡
27	2016-12-17 18:51:12	-4.53	153.47	新爱尔兰地区	7.8	6748	18	0.014	震荡
28	2016-12-09 01:38:45	-10.67	161.32	所罗门群岛	7.8	7841	21	0.075	震荡
29	2016-11-13 19:02:58	-42.53	173.05	新西兰	8	10640	31	0.068	震荡
30	2016-04-17 07:58:35	0.35	-79.95	厄瓜多尔	7.5	17252	57	0.036	震荡
31	2016-03-02 20:49:47	-4.90	94.21	印尼苏门答腊岛海域	7.8	3289	15	0.047	震荡
32	2015-10-26 17:09:32	36.50	70.80	兴都库什地区	7.8	2965	12	0.094	震荡
33	2015-09-17 06:54:31	-31.60	-71.60	智利中部沿岸近海	8.2	18752	43	0.054	震荡
34	2015-05-12 15:05:18	27.80	86.10	尼泊尔	7.5	1298	9	0.085	脉冲-震荡
35	2015-04-25 14:11:26	28.20	84.70	尼泊尔	8.1	1442	10	0.643	脉冲-震荡
36	2014-06-24 04:53:09	51.80	178.80	拉特群岛	7.9	7244	20	0.021	震荡
37	2014-04-19 21:27:59	-6.70	154.90	巴布亚新几内亚	7.6	7009	17	0.032	震荡
38	2014-04-02 07:46:47	-19.60	-70.70	智利北部沿岸近海	8.1	18777	37	0.105	震荡
39	2013-11-17 17:04:55	-60.30	-46.40	斯科舍海	7.8	15197	40	0.033	震荡
40	2013-09-24 19:29:49	27.00	65.50	巴基斯坦	7.8	3313	13	0.103	震荡
41	2013-05-24 01:19:00	-23.00	-177.10	汤加以南海域	7.6	10506	41	0.006	震荡
42	2013-04-16 18:44:13	28.10	62.10	巴基斯坦	7.7	3643	14	0.065	震荡
43	2013-02-06 09:23:20	-11.20	165.00	圣克鲁斯群岛	7.6	8218	25	0.013	震荡
44	2013-02-06 09:12:26	-10.80	165.00	圣克鲁斯群岛	7.5	8196	25	0.010	震荡
45	2013-01-05 16:58:21	55.30	-134.70	阿拉斯加海域	7.8	9817	26	0.051	震荡
46	2012-04-11 18:43:12	0.80	92.40	苏门答腊海域	8.2	2704	13	0.311	震荡
47	2012-04-11 16:38:36	2.30	93.10	苏门答腊海域	8.6	2524	10	0.520	震荡
48	2012-03-21 02:02:49	16.70	-98.20	墨西哥	7.6	15091	52	0.029	震荡
49	2012-09-05 22:42:09	10.00	-85.50	哥斯达黎加	7.9	16159	48	0.001	震荡
50	2012-08-31 20:47:33	10.80	126.80	菲律宾群岛海域	7.6	3342	14	0.179	震荡

等^[7]将水位同震变化分为震荡和阶变2种类型,张清秀等^[8]提出脉冲型同震响应类型。从表3和图3可以看出,德宏法帕井静水位分钟值曲线对 M_S 7.5以上地震的同震响应形态表现为脉冲-震荡型和振荡型2种,其中以震荡型为主,约占96%,仅有4%的地震同震响应形态表现为脉冲-震荡型,如2015年5月12日发生在尼泊尔的 M_S 7.5地震和2015年4月25日发

生在尼泊尔的 M_S 8.1地震,井震距分别为1298 km和1442 km,两次地震造成德宏法帕井静水位同震响应形态首先表现为脉冲型,最大水位变化幅度为0.643 m,脉冲结束后又以震荡型为主,震荡结束后德宏法帕井水位曲线又恢复至原来的形态变化(图3a和图3b),其余地震同震响应形态均表现为震荡型。2017年9月8日发生在墨西哥沿岸近海的 M_S 8.2地震

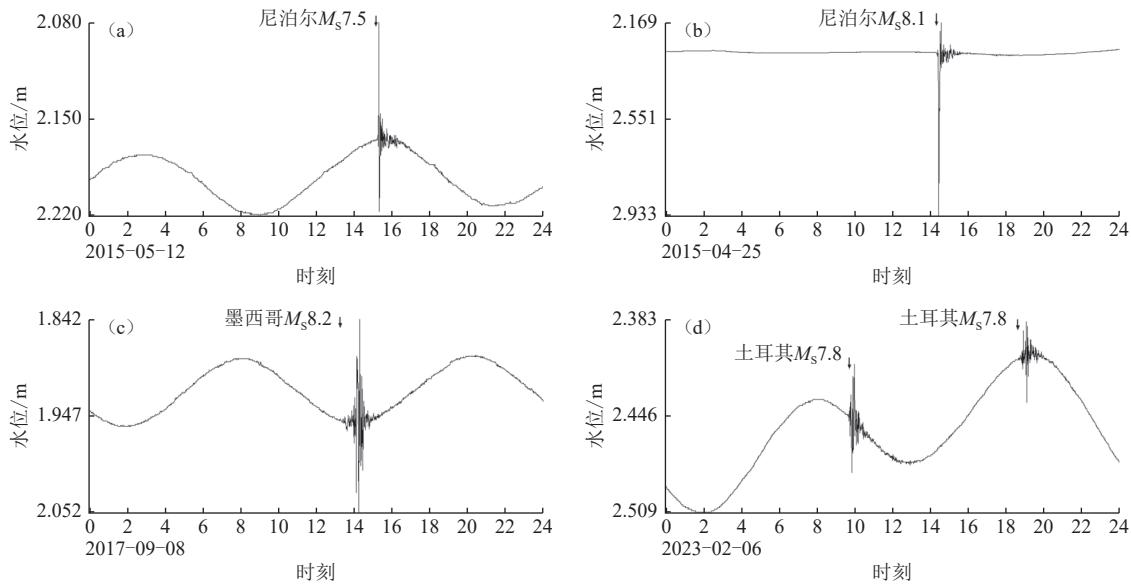


图3 德宏法帕井静水位典型脉冲-震荡型和震荡型同震响应曲线

Fig. 3 Typical pulse-oscillation and oscillation co-seismic response curves of static water level in Dehongfapa well

(图3c), 井震距为15419 km; 2023年2月6日发生在土耳其的两次Ms7.8地震(图3d), 井震距分别为5923 km和5947 km, 同震响应形态均表现为震荡型, 震荡结束后曲线又恢复至原来水平。经研究总结发现, 德宏法帕井静水位分钟值曲线对于远场大震的响应形态以震荡型为主, 只有极少部分同震响应形态表现为脉冲-震荡型。

3.2 水位变幅与震级和井震距的响应关系

杨竹转等^[9]研究了云南思茅井水位变化幅度与震级和井震距的关系, 结果表明水位同震响应变化幅度与震级和井震距满足关系为:

$$\lg \Delta h = aM + b \lg D + c \quad (1)$$

式中, Δh 为水位同震响应变化幅度, M 为震级, D 为井震距, a 、 b 、 c 为常数。将表3中的静水位变化幅度与震级和井震距带入公式进行二元回归分析, 可以得到关系式:

$$\lg \Delta h = 1.100364M - 0.88247 \lg D - 6.63896 \quad (2)$$

由式(2)可知, 德宏法帕井静水位同震响应变幅与震级成正相关, 即随着震级的增大, 水位变幅也增大; 水位同震响应变幅与井震距的对数成负相关, 即随着井震距增大, 水位变幅反而减小。

图4为德宏法帕井静水位同震变化幅度实测值与拟合值的对比图, 拟合值由式(2)计算而得, 由图可见实测值和拟合值曲线变化形态几乎一致, 但仍部分拟合值与实测值差异较大, 推测水位同震变化幅度可能还与震源深度及地质构造有关, 还须进

一步研究。

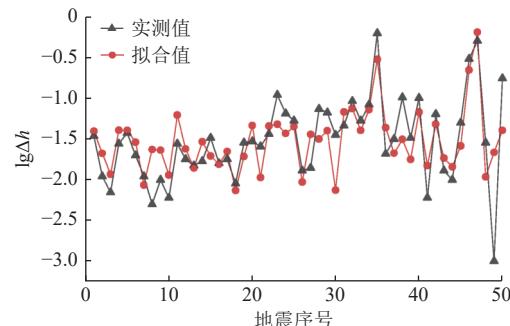


图4 德宏法帕井静水位变化幅度拟合值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between fitting and measured values of static water level change in Dehongfapa well

3.3 响应时间与井震距的响应关系

由表3可知, 井震距不同, 德宏法帕井静水位同震响应时间也不同。对同震响应时间进行统计分析得知, 德宏法帕井静水位同震响应时间为6~57 min, 其中1~10 min共有7次地震, 占比约为14%, 11~20 min共有19次地震, 占比约为38%, 21~30 min共有9次地震, 占比约为18%, 31~40 min共有4次地震, 占比约为8%, 大于40 min有11次地震, 占比约为22%。其中, 响应时间最长的为2016年4月17日发生在厄瓜多尔的Ms7.5地震, 响应时间为57 min, 井震距为17252 km; 响应时间最短的为2020年3月25日发生在千岛群岛的Ms7.5地震, 响应时间为6 min, 井震距为5762 km。根据响应时间和井震距绘出散点图(图5), 通过线性拟合可得关系式:

$$T = 0.00252D + 2.42726 \quad (3)$$

式中, T 为响应时间, D 为井震距, 拟合后相关系数 R^2 为 0.8508。根据式(3)可得, 随着井震距的增加, 德宏法帕井静水位同震响应时间也逐渐增加, 即响应时间和井震距成正比关系。

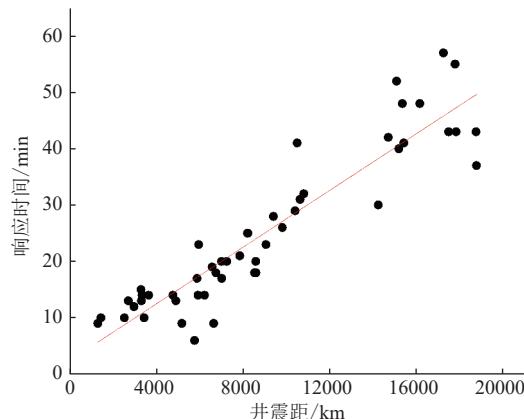


图 5 同震响应时间与井震距关系图

Fig. 5 Relationship between coseismic response time and well seismic distance

3.4 机理探讨

一般认为, 水位同震响应的机理为地震波的作用使含水层发生压缩与膨胀相互交替的变形, 含水层内孔隙压力发生升降交替, 导致井与含水层间交替产生水流运动, 最终表现为井内水柱的反复升降变化, 即井水位的振荡^[10]。根据前人研究结果显示, 井水位对近震和远震有不同的响应特征, 远震响应形态以震荡型为主, 近震响应形态以阶变型和脉冲型为主^[11]。但在实际的水位观测中, 德宏法帕井静水位的同震响应形态不是单一的类型, 还出现了较为复杂的复合类型, 如脉冲-震荡型, 2015年5月12日发生在尼泊尔的 $M_{\text{g}}7.5$ 地震和2015年4月25日发生在尼泊尔的 $M_{\text{g}}8.1$ 地震, 两次地震造成德宏法帕井静水位同震响应形态均为较为复杂的脉冲-震荡型。德宏法帕井静水位的同震响应形态与前人研究结果一致, 即以震荡型为主, 只有极少部分同震响应形态表现为脉冲-震荡型。井孔含水层对远场大震的响应一般以弹性变形为主, 所以德宏法帕井对大部分远场大震都记录到水震波, 即同震表现形式以震荡型为主。对于脉冲-震荡型的同震响应类型, 可能是因为井水位的弹性形变引起的, 只是由于地震震级较大, 井震距较近及传播路径介质等原因, 传播到该井的地震波能量太大, 引起的水位弹性变形时间较短, 且该井所使用的观测仪器采样率为 1 次/min, 导致仪

器对同震变化波形记录有所缺失, 所以水位曲线首先表现为脉冲型, 而后地震波能量逐渐减小, 引起的水位弹性变形时间相对变长, 所以水位曲线又表现为震荡型, 但由于同震响应形态表现为脉冲-震荡型的地震样本数量较少, 还须后续持续关注。

德宏法帕井含水层埋深为 92.61 m, 岩性为中层状泥灰岩, 含承压岩溶水, 水位 2.5 m, 上顶板厚 24.26 m, 岩性为粉砂质泥岩, 密封性较好。已有研究证明, 这类含水层一般受降雨和浅地表水体的影响较小^[12], 且德宏法帕井的含水层导水能力强, 即井-含水层振动的阻尼系数较小, 意味着振动的阻力小; 在地震波作用过程中, 观测井与含水层水流交换时的能量损失较小, 水位对地震波的响应能力更强, 即响应幅度比更大。水位同震响应的幅度与观测井含水层的岩性有关, 一般灰岩对地震波的响应强于变质岩, 变质岩对地震波的响应强于砂岩, 砂岩对地震波的响应强于第四系砂砾石, 德宏法帕井含水层岩性为中层状泥灰岩, 其对地震波的响应较好。德宏法帕井静水位的同震响应变化幅度一般与震级成正相关, 与井震距成负相关, 一般认为震级相近、井震距较小的地震, 由于距离较近, 地震波传至观测井周围时能量损失较小, 导致井周围介质受到挤压更为明显, 使得井水与含水层压差更大, 从而导致响应幅度较大; 对于井震距相近, 震级较大的地震, 由于震级较大, 地震波传至观测井周围时能量也相对较大, 所以响应幅度也相对较大。德宏法帕井同震响应时间与井震距成正相关, 分析认为由于地震波传播具有一定的速度, 若震中离井区较远, 地震波传至观测井的时间就相对较长, 但同震响应时间也不是严格的线性增加。由于地震波是一种弹性波, 且地球内部物质均匀不一, 导致地震波在不同介质传播时容易发生反射以致传播路径复杂多变, 致使传播时间有一定差异。

4 结论

本文从德宏法帕井静水位数据观测情况及同震响应特征进行分析, 得出以下结论:

(1) 德宏法帕井静水位观测仪器较为稳定, 数据连续可靠, 观测数据固体潮日变形态清晰, 日变规律较为明显, 变化形态表现为较为明显的日波和半日波, 观测资料精度相对较高。

(2) 德宏法帕井静水位对 7.0 级以上地震响应较为灵敏, 7.0 级以上地震同震响应比为 82.8%, 8.0 级以上地震同震响应比为 100%, 说明该井对大震具有

显著的同震响应。

(3) 德宏法帕井静水位对不同地震表现出不同的同震响应形态, 对于远场大震主要以震荡型为主, 极少数表现出脉冲-震荡型。

(4) 对于 $M_S 7.5$ 以上地震, 德宏法帕井静水位的

同震响应变化幅度一般与震级成正相关, 与井震距的对数成负相关, 即德宏法帕井静水位同震响应变化幅度随着震级的增大而增大, 随着井震距的增大而减小。同时同震响应时间和井震距成正相关, 即响应时间随着井震距的增大而增大。

参考文献

- [1] 杨竹转, 邓志辉, 高小其, 等. 新疆乌鲁木齐 04 号井数字化水位同震阶变的研究 [J]. *中国地震*, 2010, 26(3): 329-339
Yang Z Z, Deng Z H, Gao X Q, et al. Study on coseismic drop steps of water level based on the digital observation from Xin-04 well, Urumqi, Xinjiang[J]. *Earthquake Research in China*, 2010, 26(3): 329-339
- [2] 刘阁, 姬霄鹤, 郭少峰, 等. 范县井水位对远场大震的同震响应特征 [J]. *华北地震科学*, 2023, 41(3): 74-79
Liu G, Ji X H, Guo S F, et al. Co-seismic response characteristics of well water level in Fanxian well to large teleseismic[J]. *North China Earthquake Sciences*, 2023, 41(3): 74-79
- [3] 沈平, 敬少群, 姚海东. 湖南省地下流体井水位对远场大震的同震响应特征分析 [J]. *防灾减灾学报*, 2021, 37(2): 32-38
Shen P, Jing S Q, Yao H D. Analysis on co-seismic response characteristics to teleseism recorded by underground fluid well water level in Hunan[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 2021, 37(2): 32-38
- [4] 王金霞, 吴玉卫, 周洋, 等. 云南德宏法帕井数字化观测资料动态及前兆异常特征分析 [J]. *地震科学进展*, 2025, 55(4): 209-217
Wang J X, Wu Y W, Zhou Y, et al. Analysis of observation data dynamics and precursor anomalies of digital observation data of the Dehongfapa well[J]. *Progress in Earthquake Sciences*, 2025, 55(4): 209-217
- [5] 车用太, 孔令昌, 陈华静, 等. 地下流体数字观测技术 [M]. 北京: 地震出版社, 2002
Che Y T, Kong L C, Chen H J, et al. Digital observation technology of underground fluid[M]. Beijing: Seismological Press, 2002
- [6] 张素欣, 张子广, 刘俊明, 等. 数字化水位观测资料的应用研究 [J]. *地震*, 2002, 22(4): 89-93
Zhang S X, Zhang Z G, Liu J M, et al. Application and analysis of digitized observation data of underground water level in Hebei Province[J]. *Earthquake*, 2002, 22(4): 89-93
- [7] 付虹, 刘丽芳, 王世芹, 等. 地方震及近震地下水同震震后效应研究 [J]. *地震*, 2002, 22(4): 55-66
Fu H, Liu L F, Wang S Q, et al. Research on coseismic and post seismic effect of ground water for the local and near earthquake[J]. *Earthquake*, 2002, 22(4): 55-66
- [8] 张清秀, 陈小云, 陈莹, 等. 福建省数字化水位水温资料的远场效应研究 [J]. *华北地震科学*, 2007, 25(4): 49-54
Zhang Q X, Chen X Y, Chen Y, et al. The far-field effect of digital water lever and temperature data in Fujian Province[J]. *North China Earthquake Sciences*, 2007, 25(4): 49-54
- [9] 杨竹转, 邓志辉, 赵云旭, 等. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究 [J]. *地震学报*, 2005, 27(5): 569-574
Yang Z Z, Deng Z H, Zhao Y X, et al. Preliminary study on coseismic steps of water-level in Dazhai well, Simao City, Yunnan Province[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005, 27(5): 569-574
- [10] 鱼金子, 车用太, 刘成龙, 等. 金沙江水网对日本 9.0 级地震的同震响应及其特征与机理 [J]. *地震*, 2012, 32(1): 59-69
Yu J Z, Che Y T, Liu C L, et al. Coseismic responses of water level and temperature in wells of the Jinshajiang groundwater observation network to the Japan $M_S 9.0$ earthquake: Characteristics and mechanism[J]. *Earthquake*, 2012, 32(1): 59-69
- [11] 沈平, 敬少群, 姚海东, 等. 湖南长沙井动水位对远大地震的同震响应特征分析 [J]. *地球物理学进展*, 2018, 33(1): 74-83
Shen P, Jing S Q, Yao H D, et al. Analysis on co-seismic response characteristics to teleseism recorded by Changsha well's dynamic water level in Hunan Province[J]. *Progress in Geophysics*, 2018, 33(1): 74-83
- [12] 陈大庆, 刘耀炜, 杨选辉, 等. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究 [J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 122-132
Chen D Q, Liu Y W, Yang X H, et al. Co-seismic water level, temperature responses of some wells to far-field strong earthquakes and their mechanisms[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 122-132