地震科学进展
PROGRESS IN EARTHQUAKE SCIENCES
ISSN 2096-7780 CN 10-1665/P

云南井网水温和水位对几次典型地震的响应特征研究

段美芳，陈 佳，陆丽娜

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

Duan Meifang, Chen Jia, and Lu Lina

在线阅读 View online: https://doi.org/10.19987/j.dzkxjz.2023-105

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

无极井水位同震效应特征浅析

Analysis on characteristics of coseismic effect of Wuji well

地震科学进展. 2018(1): 17-20

福建永安井水温观测中的干扰因素浅析

Analysis of affecting factors on water temperature of Yong’an well in Fujian

地震科学进展. 2020(12): 7-14

豫01井水位急剧下降原因调查与分析

Investigation and analysis on the cause of the sharpdrop of water level in well Yu-01

地震科学进展. 2020(9): 16-19

德令哈台尕海井水位异常分析

Analysis on the water level anomaly at Delingha Gahai well in Qinghai Province

地震科学进展. 2020(2): 36-39

五河女山井水温数据跟踪分析中的常见案例分析

Analysis of some common breakdown of water temperature data in N ü shan， Wuhe well

地震科学进展. 2019(3): 15-18

云南腾冲地震台井水位对大地震的同震响应

Coseismic response of water level to large earthquakes in Tengchong seismic station well, Yunnan Province

地震科学进展. 2019(8): 116-116

关注微信公众号，获得更多资讯信息

段美芳, 陈佳, 陆丽娜. 云南井网水温和水位对几次典型地震的响应特征研究 [J]. 地震科学进展, 2024, 54(5): 316-330. doi:10.19987/j.dzkxjz.2023-105
Duan M F, Chen J, Lu L N. Coseismic response characteristics of groundwater temperature and level of Yunnan well network to several earthquakes[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2024, 54(5): 316-330. doi:10.19987/j.dzkxjz.2023-105

学术论文

云南井网水温和水位对几次典型地震的响应特征研究

段美芳[1, 2)]　陈　佳[1, 2)]　陆丽娜[3, 4)※]

1) 中国地震科学实验场大理中心，云南大理　671000
2) 云南省地震局下关地震监测中心站，云南大理　671000
3) 防灾科技学院，河北三河　065201
4) 河北省地震动力学重点实验室，河北三河　065201

摘要　基于 2008—2023 年云南井网中 26 口观测井水温和水位的同震响应资料，以对云南地区影响较显著的 8 次地震为例，对比分析各观测井水温和水位的同震响应特征，分别从地震波能量密度、岩性、断裂带的控制作用以及动态协调性等角度对其同震响应机理进行了探讨。结果表明，云南井网水温和水位对远场大震的响应较近震显著，响应主要集中在滇中一带，水位响应较水温显著，水位同震变化以振荡和上升为主，水温以脉冲为主。德宏法帕滇 22 井和丽江象山井有更好的响应能力，剑川滇 06 井、会泽甘沟滇 01 井、昆明官渡区小哨井、大姚地温井和南华震 2 井的同震响应能力较其余 21 口井弱。进一步分析表明，地震波能量密度与震中距线性拟合相关系数大于−0.9，成明显负相关，与震级成正相关，并给出了能量密度与渗透系数的对应关系。最后分别对水温和水位同震响应机理进行了探讨。

关键词　云南井网；水温；水位；同震响应
中图分类号： P315.72　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 2096-7780(2024)05-0316-15
doi： 10.19987/j.dzkxjz.2023-105

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

Duan Meifang[1, 2)], Chen Jia[1, 2)], Lu Lina[3, 4)]

1) Dali Center of China Earthquake Science Experimental Site, Yunnan Dali 671000, China
2) Xiaguan Seismic Station of Yunnan Earthquake Agency, Yunnan Dali 671000, China
3) Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China
4) Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Hebei Sanhe 065201, China

收稿日期：2023-08-02；采用日期：2023-10-24。
基金项目：中国地震科学实验场大理中心第一批科技人员传帮带项目（DCQ1-2023-01）资助。
第一作者：段美芳（1994-），女，助理工程师，主要从事地震监测预报研究。E-mail：duanmeifangfang@163.com。
※ 通信作者：陆丽娜（1982-），女，副教授，主要从事地球化学和地震地质学研究。E-mail：lulina@cidp.edu.cn。

Abstract　Based on the coseismic response data of water temperature and water level of 26 observation wells in Yunnan well network from 2008 to 2023, the coseismic response characteristics of water temperature and water level of each observation well were compared and analyzed with 8 earthquakes that have a significant impact on Yunnan region. The coseismic response mechanism was discussed from the perspectives of seismic wave energy density, lithology, control of fault zone and dynamic coordination. The results indicate that the response of water temperature and water level in the well pattern of Yunnan to the far-field earthquakes is more significant than near earthquakes, with the response primarily concentrated in the middle of Yunnan. The water level exhibits a more pronounced response than the water temperature. The coseismic variation of water level is mainly characterized by oscillation and rise, while the water temperature is mainly characterized by pulses. Dehong Fapa Dian No.22 well and Lijiang Xiangshan well have better seismic reflection performance in Yunnan well pattern. On the other hand, No.06 well in Jianchuan, No.01 well in Huize Gangou Dian, Xiaoshao well in Kunming Guandu District, Dayao geothermal well, and Nanhua Zhen 2 well exhibit weaker coseismic responses compared to the other 21 wells. Further analysis shows that the linear fitting correlation coefficient between seismic wave energy density and epicenter distance is greater than −0.9, which is significantly negative correlation and positive correlation with magnitude, and shows the corresponding relationship between energy density and permeability coefficient. Finally, we analyzed the mechanism of coseismic response of water temperature and water level.

Keywords　Yunnan well network; water temperature; water level; coseismic response

0　引言

水温和水位作为地下流体的重要观测手段，其变化可以反映地壳运动的活动性，在地震预测和预报中起着重要作用。有学者采用“一震多井”[1]、“一井多震”[2]、“一震一井”[3]的方法对云南地区水温水位同震响应做了不同程度的研究并取得了一定的成果。但因受限于地震频次、观测技术和观测台站密度等因素，目前，该项工作仍缺乏利用多个地震对云南井网响应特征的系统研究。中国地震局“十五”重大工程项目之“中国数字地震观测网络”的实施，为云南地区水温和水位的同震响应研究提供了较好的数据基础。

为更好地监测研究云南地区地震活动性和观测井同震变化情况，本文系统收集和整理了云南井网水温和水位的长期监测数据，采用“多震多井”的研究方式，分析和总结同震响应特征，结合井孔水文地质条件探讨不同响应现象的可能机理，并对云南井网地下流体的同震响应能力进行评价，为今后提高研究区监测能力以及监测井的布设提供参考。

1　研究对象

1.1　云南流体观测井网概况

云南地区于 1982 年陆续开展地下流体观测，经过近 40 年的发展，已建立了比较完善的地震地下流体观测网。到目前为止，在云南地区模拟及数字化观测台网中，水温共计 97 项，水位共计 104 项，其中，水温水位同井运行观测的有 87 口，占所有测井的 84%，基本实现高精度、高分辨率、实时监测和数据共享。

现用的水位观测仪器有 3 种：LN-3A 型、SWY-2 型和 ZKGD3000 数字化水位仪。除 SWY-2 水位仪为秒采样外，其他两种水位仪均为分钟采样，3 套仪器分辨率均优于 1 mm。现用的水温观测仪器有 5 种：SZW-1A、SZW-1、SZW-2、SZW-1AV2004 和ZKGD3000-NT 型数字水温仪。其中，SZW-2 水温仪为秒采样，其余仪器均为分钟采样，5 套仪器分辨率均为±0.000 1℃。为保证数据一致性，本文统一采用分钟值进行研究。

本文以 2008—2023 年间我国及邻区发生的重大地震为例，研究云南井网的同震响应特征。经调查，此期间发生的并能显著引起云南地区地下流体同震响应的重大地震有 8 次（表 1）。其中，2008 年 5 月 12 日汶川 M_S8.0 地震，2011 年 3 月 11 日日本 M_S9.0 地震，2012 年 4 月 11 日苏门答腊 M_S8.6 地震和 2015 年 4 月 25 日尼泊尔 M_S8.1 地震为远场大震（震中距在 1 000 km 以上）；2013 年 4 月 20 日芦山 M_S7.0 地震、2014 年 8 月 3 日鲁甸 M_S6.5 地震、2017 年 8 月 8 日九寨沟 M_S7.0 地震和 2021 年 5 月 21 日漾濞 M_S6.4 地震为近场地震（震中距在 100～1 000 km 之间）。

1.2　数据来源和选取

水温和水位观测资料来源于云南省前兆台网数据库，考虑到下文需从观测井、测项和同震响应 3 方面进行多角度综合分析对比，所选观测井需满足如

表 1 所选地震基本信息

Table 1 Basic information of selected earthquakes

序号	地点	发震时刻(BJT)(年-月-日 时:分)	震级(M_S)	北纬/°	东经/°	震源深度/km
1	四川汶川	2008-05-12 14:28	8.0	31.00	103.40	14
2	日本本州东海岸附近海域	2011-03-11 13:46	9.0	38.10	142.60	30
3	苏门答腊北部附近海域	2012-04-11 16:38	8.6	2.30	93.10	33
4	四川芦山	2013-04-20 08:02	7.0	30.30	103.00	13
5	云南鲁甸	2014-08-03 16:30	6.5	27.10	103.30	12
6	尼泊尔	2015-04-25 14:11	8.1	28.20	84.70	20
7	四川九寨沟	2017-08-08 21:19	7.0	33.20	103.80	20
8	云南漾濞	2021-05-21 21:48	6.4	25.67	99.87	8

下两个特征：①水温水位同井观测，且在地震响应前后仪器都正常工作；②选取的 8 次地震中至少有一次地震引起了水温水位中一个测项的同震响应。基于上述原则，本文挑选出 26 口数字化观测井进行研究。为了进一步分析同震响应特征，本文分别对观测井的分布情况和基本参数进行了统计(图 1，表 2)。

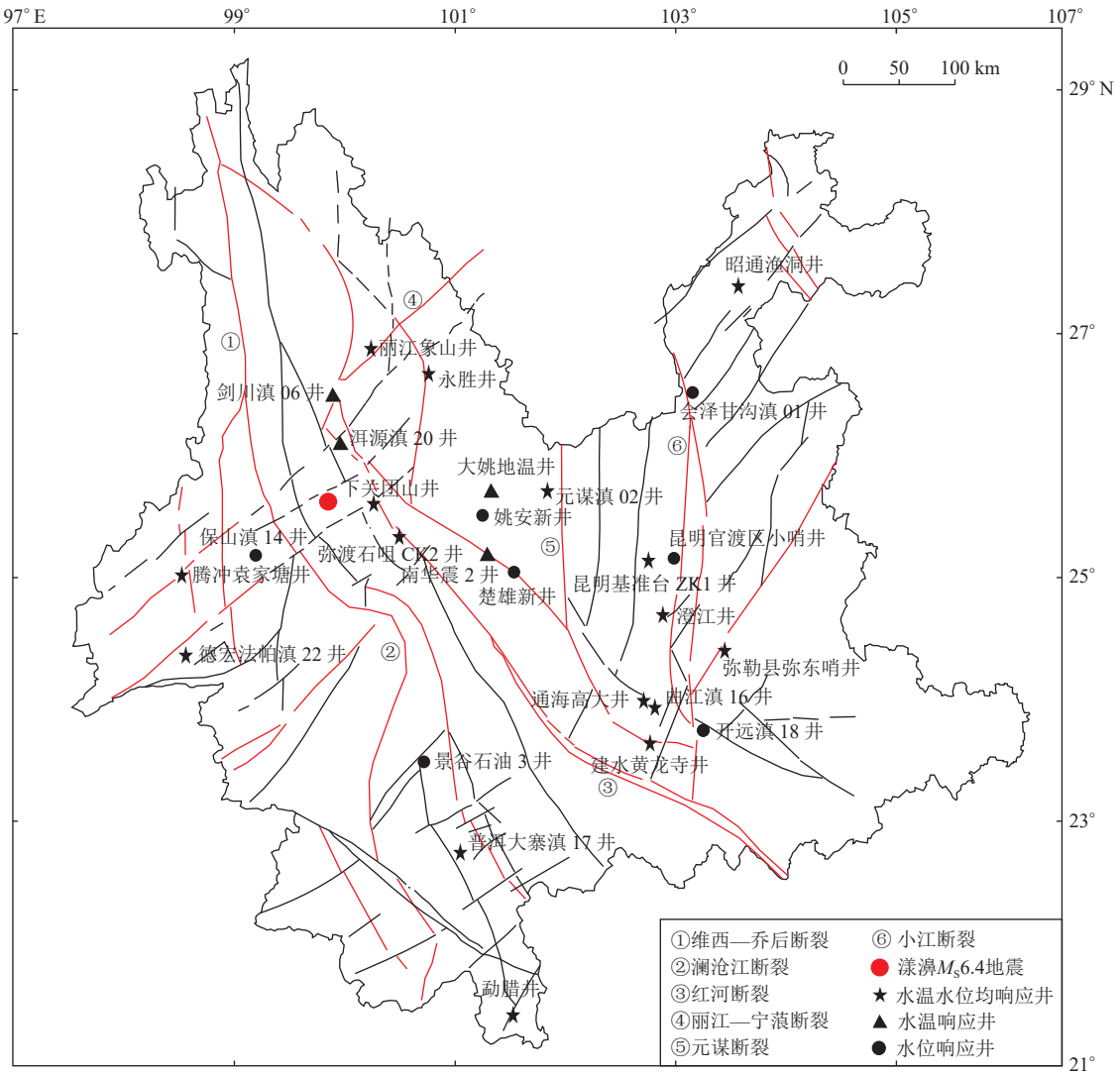


图 1 观测井空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution map of observation wells

表 2　云南数字化水温水位观测井基本参数

Table 2　Basic parameters of digital water temperature and water level observation wells in Yunnan

编号	井点名称	构造部位	含水层岩性	完钻井深/m	套管深度/m	地下水类型
1	德宏法帕滇22井	龙陵—瑞丽断裂南侧	泥灰岩	200.17	95.57	岩溶裂隙承压水
2	建水黄龙寺井	石屏—建水弧形断裂	灰岩	180.21	143.54	岩溶裂隙承压水
3	开远滇18井	朋普—开远—个旧断裂	灰岩	224.00	169.38	岩溶裂隙承压水
4	昆明基准台ZK1井	官渡—黑龙潭断裂	玄武岩、白云质灰岩	271.20	162.81	岩溶裂隙承压水
5	腾冲袁家塘井	上马厂断裂与后山断裂交汇处	安山岩、凝灰岩	120.00	117.00	火山岩孔裂隙承压水
6	下关团山井	红河断裂与西洱河断裂交汇处	砾岩、粉砂岩	315.07	315.07	基岩裂隙承压水
7	姚安新井	永仁—大姚断裂东侧10 km	泥岩、泥砂岩	253.38	350.38	基岩、孔裂隙承压水
8	永胜井	程海断裂东侧	泥岩、石英砂岩	205.00	205.00	裂隙承压水
9	澄江井	阳宗—澄江断裂	灰岩	310.00	301.00	岩溶裂隙承压水
10	剑川滇06井	中甸—剑川断裂	砂砾岩	100.21	100.21	孔裂隙承压水
11	通海高大井	曲江断裂	石英砂岩	205.00	205.00	基岩裂隙承压水
12	洱源滇20井	鹤庆—洱源断裂	苍山变质岩	266.56	165.56	基岩裂隙承压水
13	会泽甘沟滇01井	茨坪子断裂旁	砾石、细砂	103.15	87.80	孔裂隙承压水
14	丽江象山井	象山断裂	角砾岩、白云质灰岩	347.33	347.33	孔、岩溶裂隙承压水
15	弥勒县弥东哨井	弥勒—师宗断裂	泥质页岩、粉砂岩	614.40	603.58	裂隙承压水
16	普洱大寨滇17井	依象断裂	砂岩	112.27	26.69	基岩裂隙承压水
17	楚雄新井	楚雄—南华断裂南向3 km	泥岩、泥灰岩	502.80	213.55	基岩、孔裂隙承压水
18	昆明官渡区小哨井	小江断裂西侧新庄背斜轴顶部	石英砂岩、白云岩	2 156.00	1 146.50	基岩裂隙承压水
19	勐腊井	勐腊断裂北侧	石英砂岩	101.55	101.55	孔隙潜水
20	元谋滇02井	元谋—绿汁江断裂西侧2 km	变质岩	545.66	280.00	基岩裂隙承压水
21	曲江滇16井	曲江隐伏断裂	砂岩	101.23	89.04	基岩裂隙承压水
22	弥渡石咀CK2井	红河、程海断裂交汇处	灰岩	130.37	130.37	岩溶裂隙承压水
23	昭通渔洞井	昭通—鲁甸断裂	细砂岩	320.97	290.00	基岩裂隙承压水
24	保山滇14井	胡家山—施甸断裂东侧	细砂、粉砂岩	148.02	138.18	孔裂隙承压水
25	大姚地温井	永仁—大姚断裂	泥岩、粉砂岩	323.42	33.20	基岩、孔裂隙承压水
26	南华震2井	楚雄—南华断裂南侧	石英砂岩	263.20	178.08	基岩裂隙承压水

2　结果

2.1　响应形态特征

比较这 8 次地震对云南井网的影响程度(表 3)可知：云南井网水位的同震响应类型表现为脉冲、振荡、上升和下降等形式，以振荡和上升两类为主；水温的同震响应类型表现为脉冲、上升和下降，以脉冲为主。

其中，下关团山井水温水位同震响应具有明显协调性，具体表现为：对有响应的尼泊尔地震(图 2a 和图 2d)、日本地震(图 2b 和图 2e)、汶川地震(图 2c 和图 2f)和苏门答腊地震(图 2g 和图 2i)水位均表现为振荡，对漾濞地震(图 2h 和图 2j)水位表现为上升；水温变化均表现为极其相似的上升形态。5 次水位同震响应变化幅度范围为 0.019～0.073 m，水温同震响应变化幅度范围为 0.0112℃～0.08℃。

汶川 M_S8.0 地震时，云南地区共有 17 口测井记录到同震响应，其中有 9 口测井的水温水位均记录到同震响应(图 3)。在该次地震响应中，水位多表现为振荡和上升的形态，水温多表现为先降后升或趋势上升的形态，如昆明基准台 ZK1 井(图 3a 和图 3d)、建水黄龙寺井(图 3b 和图 3e)、德宏法帕滇 22 井(图 3c 和图 3f)的响应形态均表现为水位振荡，水温先下降后趋势上升；弥勒县弥东哨井(图 3g 和图 3j)和普洱大寨滇 17 井(图 3h 和图 3k)的响应形态均表现为水位阶升，水温趋势上升。

表 3　云南井网水温水位同震响应参数统计表

Table 3　Statistical table of coseismic response parameters of water temperature and water level in Yunnan well network

编号	井点&测项	汶川地震				日本地震				苏门答腊地震				芦山地震			
		形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度
1	开远滇18井静水位	下降	806	0.208	0.03862	脉冲↑	4041	0.05	0.00831	上升	2623	4.04	0.00807	/	729	/	/
2	下关团山井静水位	振荡	675	0.019	0.06611	振荡	4193	0.051	0.00743	振荡	2701	0.073	0.00738	/	588	/	/
3	姚安新井静水位	振荡	646	0.034	0.07552	振荡	4112	0.093	0.00789	振荡	2724	0.038	0.00719	/	560	/	/
4	永胜井静水位	脉冲↑	545	0.034	0.12642	振荡	4091	0.298	0.00801	振荡	2831	0.064	0.00640	/	459	/	/
5	通海高大井静水位	上升	781	0.04	0.04249	振荡	4072	0.04	0.00812	振荡	2625	0.026	0.00805	/	701	/	/
6	德宏法帕滇22井静水位	振荡	811	0.366	0.03791	振荡	4292	1.94	0.00693	振荡	2564	1.04	0.00864	脉冲↓	724	0.032	0.00188
7	建水黄龙寺井静水位	振荡	820	0.126	0.03666	振荡	4090	0.498	0.00801	振荡	2591	0.434	0.00837	脉冲↓	740	0.019	0.00176
8	昭通渔洞井静水位	/	395	/	/	振荡	3804	3.58	0.00998	振荡	3011	1.6	0.00531	脉冲↑	322	0.068	0.02187
9	腾冲袁家塘井静水位	/	818	/	/	振荡	4376	0.033	0.00653	振荡	2593	0.043	0.00835	/	733	/	/
10	昆明基准台ZK1井静水位	脉冲↑	653	0.367	0.07310	--	4002	--	--	--	2743	--	--	--	573	--	--
11	澄江井静水位	--	706	--	--	--	4018	--	--	振荡	2700	0.176	0.00739	/	626	/	/
12	会泽甘沟滇01井静水位	/	500	/	/	/	3892	/	/	/	2898	/	/	/	422	/	/
13	洱源滇20井静水位	/	639	/	/	/	4191	/	/	/	2746	/	/	/	553	/	/
14	普洱大寨滇17井动水位	上升	947	0.386	0.02370	上升	4291	0.042	0.00693	上升	2429	0.093	0.01018	/	863	/	/
15	弥勒县弥东哨井动水位	上升	733	0.661	0.05150	上升	3989	0.532	0.00865	上升	2696	0.51	0.00742	/	656	/	/
16	丽江象山井动水位	振荡	553	0.035	0.12096	振荡	4126	0.712	0.00780	振荡	2835	0.228	0.00637	振荡	468	0.027	0.00704
17	曲江滇16井动水位	--	785	--	--	--	4068	--	--	振荡	2624	0.069	0.00806	脉冲↑	705	0.012	0.00203
18	保山滇14井动水位	上升	777	0.047	0.04316	振荡	4317	0.009	0.00680	上升	2617	0.01	0.00812	/	691	/	/
19	楚雄新井动水位	--	671	--	--	振荡	4107	0.071	0.00791	/	2701	/	/	/	586	/	/
20	元谋滇02井动水位	/	607	/	/	上升	4050	0.061	0.00826	/	2766	/	/	/	522	/	/
21	昆明官渡区小哨井动水位	--	650	--	--	/	3981	/	/	/	2755	/	/	/	570	/	/
22	勐腊井动水位	--	1074	--	--	/	4326	/	/	--	2314	--	--	--	991	--	--
23	弥渡石咀CK2井动水位	--	690	--	--	振荡	4186	0.032	0.00747	/	2682	/	/	/	603	/	/
24	下关团山井中层水温	上升	675	0.021	0.06611	上升	4193	0.0256	0.00743	上升	2701	0.0112	0.00738	/	588	/	/
25	永胜井深层水温	脉冲↓	545	0.0076	0.12642	振荡	4091	0.0084	0.00801	--	2831	--	--	脉冲↑	459	0.0016	0.00747
26	通海高大井中层水温	下降	781	0.0169	0.04249	脉冲↓	4072	0.1331	0.00812	下降	2625	0.0218	0.00805	/	701	/	/
27	建水黄龙寺井深层水温	脉冲↓	820	0.128	0.03666	脉冲↓	4090	0.0898	0.00801	脉冲↓	2591	0.0992	0.00837	脉冲↓	740	0.0608	0.00176
28	昭通渔洞井深层水温	脉冲↑	395	0.14	0.33532	脉冲↑	3804	0.1234	0.00998	脉冲↑	3011	0.176	0.00531	/	322	/	/
29	腾冲袁家塘井深层水温	上升	818	0.001	0.03693	/	4376	/	/	/	2593	/	/	/	733	/	/

续表 3

编号	井点&测项	汶川地震				日本地震				苏门答腊地震				芦山地震			
		形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度
30	澄江井中层水温	--	706	--	--	上升	4018	0.0854	0.00846	脉冲↑	2700	0.0791	0.00739	上升	626	0.0156	0.00292
31	昆明基准台ZK1井深层水温	脉冲↓	653	0.0946	0.07310	--	4002	--	--	--	2743	--	--	--	573	--	--
32	普洱大寨滇17井浅层水温	上升	947	0.0155	0.02370	上升	4291	0.0104	0.00693	上升	2429	0.0181	0.01018	/	863	/	/
33	弥勒县弥东哨井中层水温	上升	733	0.0259	0.05150	--	3989	--	--	/	2696	/	/	/	656	/	/
34	丽江象山井深层水温	脉冲↓	553	0.0056	0.12096	振荡	4126	0.0067	0.00780	脉冲↓	2835	0.0062	0.00637	脉冲↓	468	0.0022	0.00704
35	曲江滇16井中层水温	--	785	--	--	--	4068	--	--	--	2624	--	--	--	705	--	--
36	元谋滇02井深层水温	下降	607	0.0176	0.09121	下降	4050	0.0108	0.00826	下降	2766	0.0014	0.00687	/	522	/	/
37	德宏法帕滇22井深层水温	脉冲↓	811	0.0067	0.03791	脉冲↓	4292	0.0124	0.00693	脉冲↓	2564	0.0114	0.00864	/	724	/	/
38	大姚地温井浅层水温	--	620	--	--	--	4093	--	--	--	2749	--	--	--	534	--	--
39	剑川滇06井深层水温	/	606	/	/	/	4175	/	/	/	2786	/	/	/	520	/	/
40	弥渡石咀CK2井深层水温	上升	690	0.0009	0.06185	/	4186	/	/	/	2682	/	/	/	603	/	/
41	南华震2井深层水温	--	677	--	--	--	4127	--	--	--	2692	--	--	--	592	--	--
42	勐腊井深层水温	上升	1074	0.0068	0.01618	/	4326	/	/	/	2314	/	/	/	991	/	/
43	洱源滇20井中层水温	--	639	--	--	--	4191	--	--	--	2746	--	--	--	553	--	--

编号	井点&测项	鲁甸地震				尼泊尔地震				九寨沟地震				漾濞地震			
		形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度
1	开远滇18井静水位	/	373	/	/	振荡	1917	0.064	0.00391	/	1052	/	/	/	402	/	/
2	下关团山井静水位	/	347	/	/	振荡	1568	0.0432	0.00719	/	912	/	/	上升	39	0.044	1.75897
3	姚安新井静水位	脉冲↓	271	0.035	0.00691	振荡	1666	0.016	0.00598	/	890	/	/	上升	138	0.005	0.03821
4	永胜井静水位	/	257	/	/	振荡	1592	0.078	0.00686	/	782	/	/	/	142	/	/
5	通海高大静水位	/	350	/	/	振荡	1857	0.006	0.00430	/	1028	/	/	/	341	/	/
6	德宏法帕滇22井静水位	脉冲↓	454	0.012	0.00145	振荡	1572	0.764	0.00713	振荡	1049	0.031	0.00061	振荡	195	0.015	0.01340
7	建水黄龙寺井静水位	/	388	/	/	振荡	1872	0.088	0.00420	脉冲↑	1066	0.02	0.00058	/	368	/	/
8	昭通渔洞井静水位	--	48	--	--	振荡	1856	1.2	0.00431	脉冲↑	640	0.174	0.00273	/	415	/	/
9	腾冲袁家塘井静水位	/	530	/	/	脉冲↓	1417	0.054	0.00977	/	1043	/	/	/	153	/	/
10	昆明基准台ZK1井静水位	--	224	--	--	振荡	1823	0.264	0.00455	/	901	/	/	/	295	/	/
11	澄江井静水位	/	273	/	/	振荡	1850	0.212	0.00435	脉冲↑	953	0.0155	0.00082	/	322	/	/
12	会泽甘沟滇01井静水位	下降	67	0.268	0.47705	/	1830	/	/	/	747	/	/	/	340	/	/
13	洱源滇20井静水位	/	350	/	/	/	1525	/	/	/	871	/	/	脉冲↑	49	0.02	0.88077
14	普洱大寨滇17井动水位	上升	535	0.005	0.00088	上升	1748	0.178	0.00517	--	1194	--	--	上升	347	0.031	0.00234

续表 3

编号	井点&测项	鲁甸地震				尼泊尔地震				九寨沟地震				漾濞地震			
		形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度	形态	震中距	变化幅度	能量密度
15	弥勒县弥东哨井动水位	上升	299	0.275	0.00513	上升	1908	0.592	0.00397	/	978	/	/	/	387	/	/
16	丽江象山井动水位	脉冲↑	305	0.015	0.00483	脉冲↓	1537	0.166	0.00763	/	783	/	/	下降	139	0.007	0.03738
17	曲江滇16井动水位	脉冲↑	353	0.01	0.00310	振荡	1865	0.0626	0.00425	/	1032	/	/	脉冲↑	352	0.008	0.00224
18	保山滇14井动水位	上升	470	0.017	0.00130	上升	1476	0.028	0.00863	/	1007	/	/	/	87	/	/
19	楚雄新井动水位	上升	277	0.05	0.00647	上升	1700	0.11	0.00563	/	917	/	/	上升	180	0.066	0.01708
20	元谋滇02井动水位	/	213	/	/	上升	1718	0.013	0.00545	/	853	/	/	/	197	/	/
21	昆明官渡区小哨井动水位	/	217	/	/	振荡	1845	0.0073	0.00439	/	896	/	/	/	317	/	/
22	勐腊井动水位	/	650	/	/	上升	1855	0.022	0.00432	/	1322	/	/	/	500	/	/
23	弥渡石咀CK2井动水位	/	341	/	/	/	1598	/		/	930	/	/	/	72	/	/
24	下关团山井中层水温	/	347	/	/	上升	1568	0.0278	0.00719	/	912	/	/	上升	39	0.08	1.75897
25	永胜井深层水温	/	257	/	/	/	1592	/	/	/	782	/	/	/	142	/	/
26	通海高大井中层水温	/	350	/	/	/	1857	/	/	/	1028	/	/	/	341	/	/
27	建水黄龙寺井深层水温	脉冲↓	388	0.0563	0.00233	脉冲↓	1872	0.0804	0.00420	/	1066	/	/	/	368	/	/
28	昭通渔洞井深层水温	/	48	/	/	脉冲↑	1856	0.118	0.00431	/	640	/	/	/	415	/	/
29	腾冲袁家塘井深层水温	/	530	/	/	上升	1417	0.0025	0.00977	/	1043	/	/	/	153	/	/
30	澄江井中层水温	脉冲↑	273	0.0089	0.00676	下降	1850	0.0446	0.00435	/	953	/	/	/	322	/	/
31	昆明基准台ZK1井深层水温	/	224	/	/	上升	1823	0.0354	0.00455	/	901	/	/	/	295	/	/
32	普洱大寨滇17井浅层水温	/	535	/	/	脉冲↓	1748	0.0083	0.00517	/	1194	/	/	上升	347	0.0017	0.00234
33	弥勒县弥东哨井中层水温	/	299	/	/	上升	1908	0.0626	0.00397	/	978	/	/	/	387	/	/
34	丽江象山井深层水温	脉冲↓	305	0.0016	0.00483	脉冲↓	1537	0.008	0.00763	下降	783	0.0051	0.00148	脉冲↓	139	0.0014	0.03738
35	曲江滇16井中层水温	--	353	--	--	脉冲↓	1865	0.141	0.00425	/	1032	/	/	脉冲↑	352	0.0065	0.00224
36	元谋滇02井深层水温	下降	213	0.0018	0.01434	下降	1718	0.0061	0.00545	/	853	/	/	下降	197	0.0013	0.01299
37	德宏法帕滇22井深层水温	脉冲↓	454	0.0036	0.00145	脉冲↓	1572	0.0062	0.00713	/	1049	/	/	脉冲↓	195	0.0103	0.01340
38	大姚地温井浅层水温	--	1668	--	--	--	1668	--	--	/	864	/	/	脉冲↓	145	0.008	0.03289
39	剑川滇06井深层水温	--	345	--	--	/	1511	/	/	/	834	/	/	脉冲↓	92	0.1026	0.13056
40	弥渡石咀CK2井深层水温	/	341	/	/	/	1598	/	/	/	930	/	/	/	72	/	/
41	南华震2井深层水温	--	292	--	--	--	1678	--	--	/	922	/	/	脉冲↓	149	0.0498	0.03029
42	勐腊井深层水温	/	650	/	/	/	1855	/	/	/	1322	/	/	/	500	/	/
43	洱源滇20井中层水温	/	350	/	/	/	1525	/	/	/	871	/	/	上升	49	0.0192	0.88077

注："--"代表无数据(在地震期间仪器没有安装到位或出现故障导致缺数)；"/"代表无反应；"脉冲↑"代表上升的脉冲，"脉冲↓"代表下降的脉冲。震中距单位均为km；水位变化幅度单位均为m；水温变化幅度单位均为℃；能量密度单位均为J/m^3

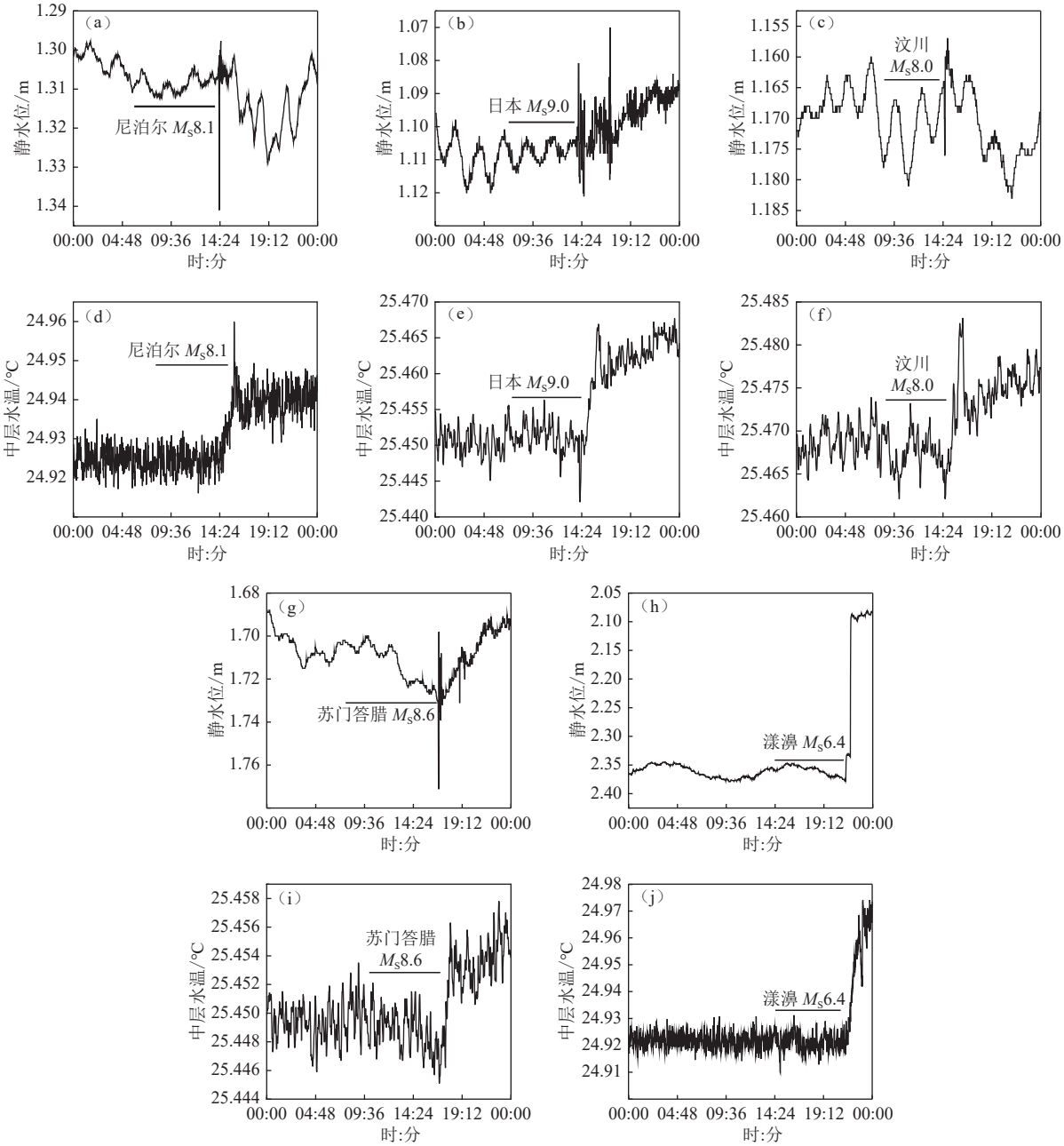


图 2　下关团山井水温水位同震响应曲线

Fig. 2　Coseismic response curves of water temperature and water level of well in Xiaguan Tuanshan

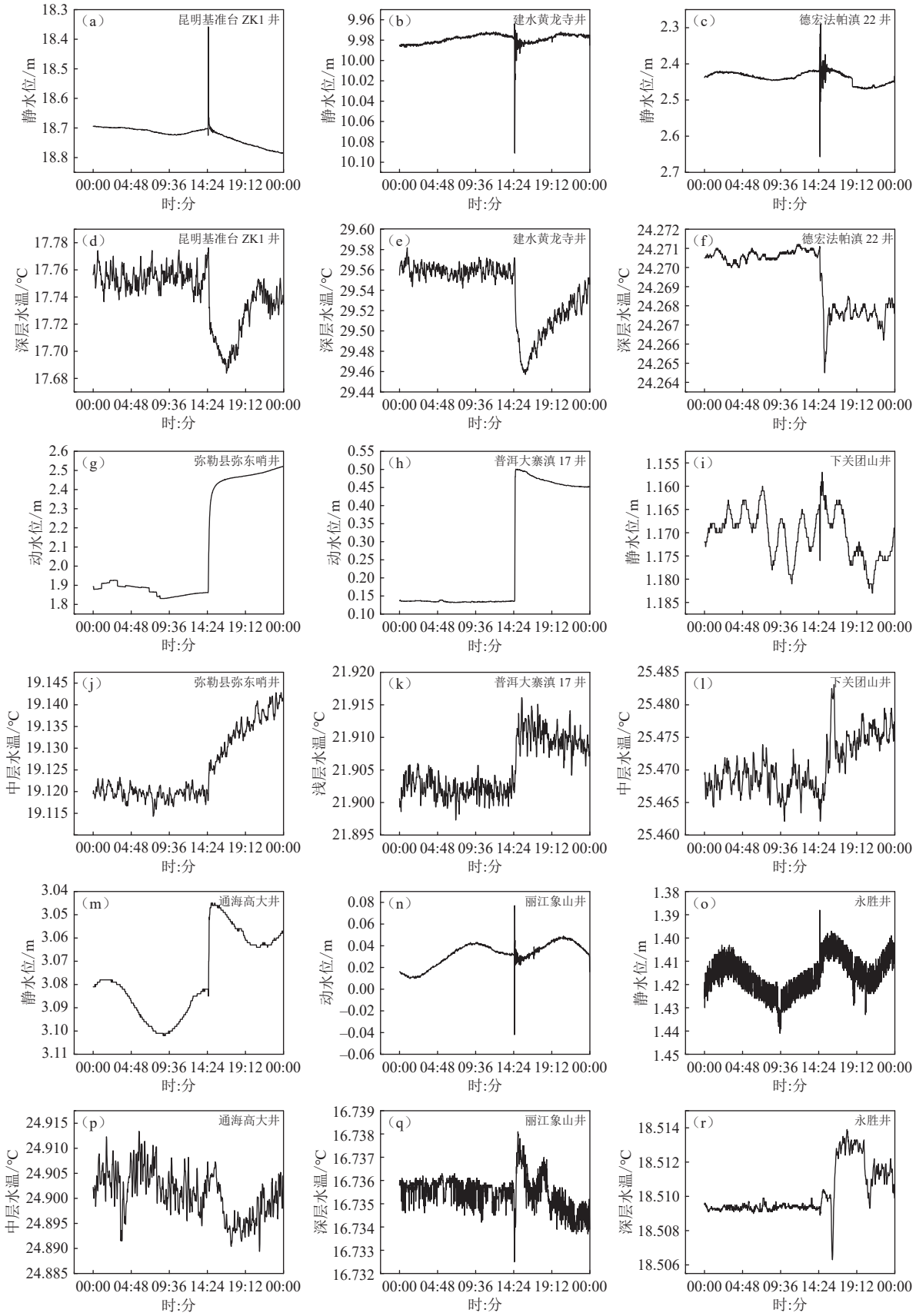
漾濞 M_S6.4 地震时，云南地区共有 8 口测井记录到水位同震响应，有 10 口测井记录到水温同震响应（图 4）。水位同震响应表现为上升、下降、振荡和向上的脉冲 4 种形态；水温同震响应表现为上升、下降、向上的脉冲和向下的脉冲 4 种形态。值得注意的是，本次地震引起元谋滇 02 井（图 4o）、剑川滇 06 井（图 4p）、南华震 2 井（图 4q）和大姚地温井（图 4r）4 口测井水温出现明显同震变化的同时水位无变化，这与以往井水温同震响应多是由水位同震变化引起的观点不一致[4-5]。

2.2　响应频次及分布特征

由表 3 可知，德宏法帕滇 22 井对 8 次地震均记录到水位同震变化；丽江象山井对 8 次地震均记录到水温同震变化，同震响应能力较强。剑川滇 06 井、会泽甘沟滇 01 井、昆明官渡区小哨井、大姚地温井和南华震 2 井对选取的 8 次地震中仅有一次地震引起了水温和水位中一个测项的同震响应，占所有观测井的 19%，说明上述 5 口井同震响应能力较其余 21 口测井弱。

从空间分布上看，8 次地震引起的同震响应主要

集中在滇中一带(图 1)。由图 5 可知，除汶川和漾濞地震水温响应测井数略高于水位外，其余地震对应的水位同震响应测井数均明显大于水温。对尼泊尔地震发生同震响应的测井数最多，共有 20 口测井水



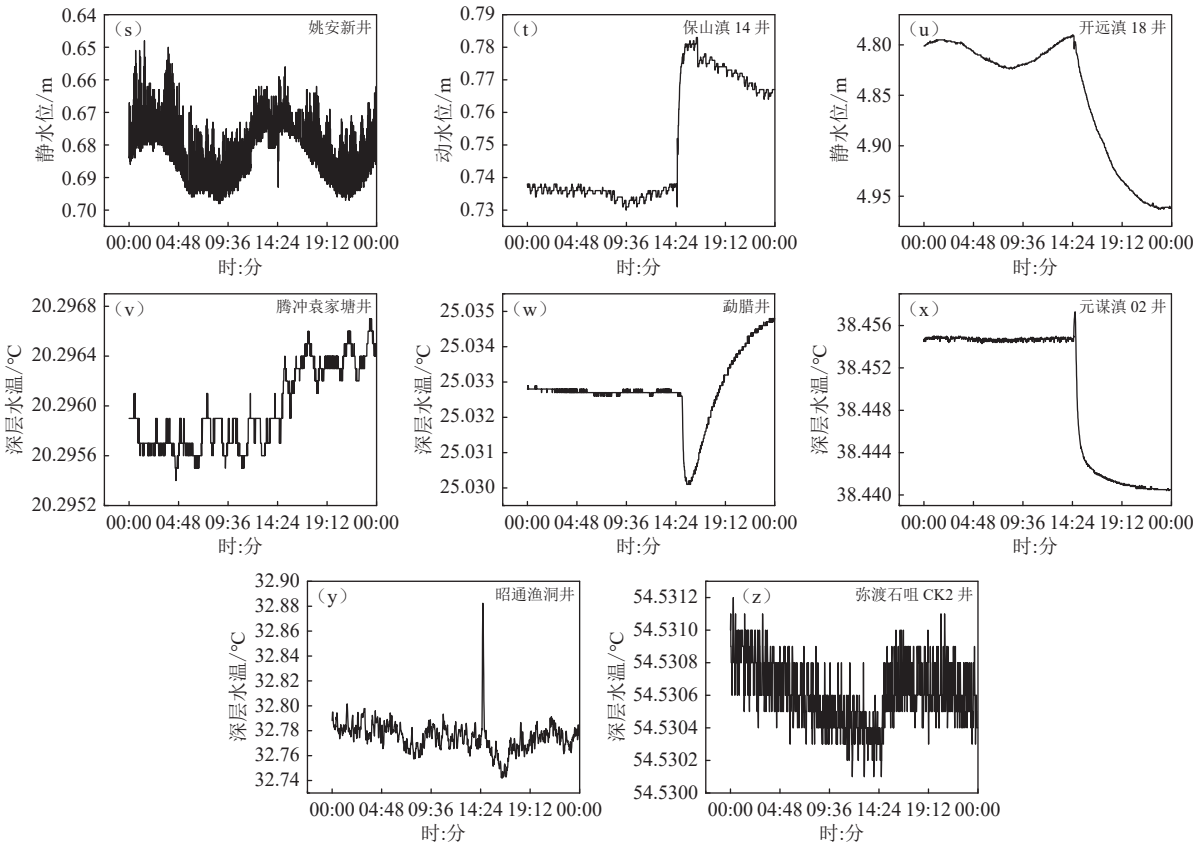


图 3　汶川地震云南井网水温水位同震响应曲线

Fig. 3　The coseismic response curves of water temperature and water level in Yunnan well pattern to Wenchuan earthquake

位记录到水震波，占所有观测井的 77%，12 口测井记录到水温变化，占所有观测井的 46%；对九寨沟地震发生同震响应的测井数最少，只有 5 口测井记录到水温水位变化。综上所述，水位的响应能力明显强于水温；测井对汶川 M_S8.0，日本 M_S9.0，苏门答腊 M_S8.6 和尼泊尔 M_S8.1 四次远场大震的响应较其他 4 次近场地震显著。

2.3　水温同震变化分析

本研究所选测井除普洱大寨滇 17 井和大姚地温井是浅层水温外，其余都是深层和中层水温。由表 3 可知，不同井水温对不同地震的响应形态和变化幅度不同，但其中 4 口井有一定规律可寻：建水黄龙寺井对有响应的 6 次地震均表现为向下的脉冲，最大变幅为 0.128℃；昭通渔洞井对有响应的 4 次地震均表现为向上的脉冲，最大变幅为 0.176℃；元谋滇 02 井对有响应的 6 次地震均表现为下降，最大变幅为 0.0176℃；下关团山井对有响应的 5 次地震均表现为上升，最大变幅为 0.0278℃。

2.4　水位同震变化分析

本研究所选观测井有 17 口为静水位观测，有 10 口井为动水位观测。相关研究表明，动水位的映震能力明显高于静水位[6]，但近年来，由于对地下水开采过多等因素，导致部分动水位观测井断流后改为静水位观测。例如：洱源滇 20 井于 1986—2008 年为动水位观测，2008 年 9 月因含水层弹性储水量的减少及周围温泉和井水开采的影响导致出水口断流，随后改为静水位观测至今；丽江象山井受降雨影响，雨季井水位高于泄流口呈自流状态，旱季则处于低水位不自流。不同井对不同地震水位的响应形态和变化幅度不同，但其中 4 口井对有响应的地震同震方向始终保持一致，主要表现为：

（1）下关团山井静水位：对尼泊尔、日本、汶川和苏门答腊 4 次地震的响应形态均表现为振荡型。从变化幅度来看，苏门答腊地震时该井变化幅度最大，达到 0.073 m，汶川地震时变化幅度最小，只有 0.019 m。

（2）普洱大寨滇 17 井动水位：对尼泊尔、日本、汶川、苏门答腊、鲁甸和漾濞 6 次地震的响应形态均表现为上升型，这与以往思茅井水位的同震变化总是上升的研究结果[5, 7]较一致。汶川地震时该井响应

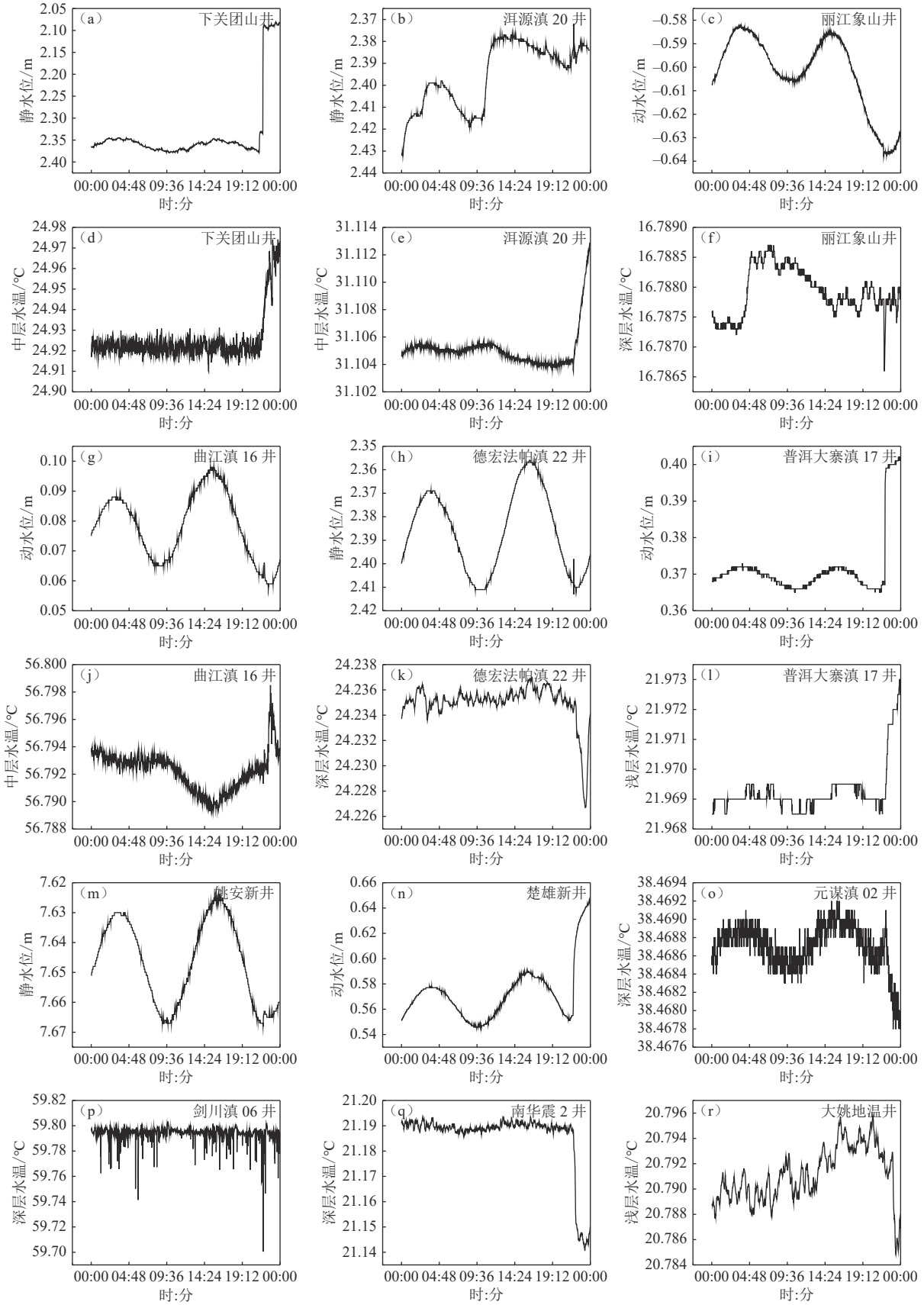


图 4 漾濞地震云南井网水温水位同震响应曲线

Fig. 4 The coseismic response curves of water temperature and water level in Yunnan well pattern of Yangbi earthquake

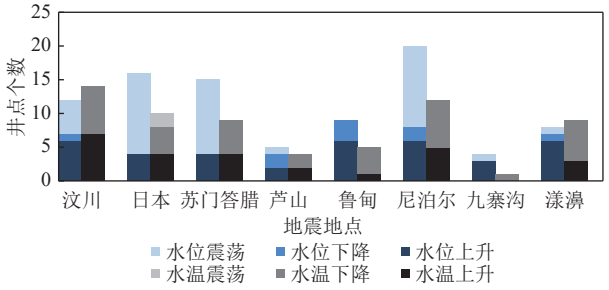


图 5　云南井网水温水位同震响应统计图

Fig. 5　Coseismic response statistical diagram of water temperature and water level in Yunnan well network

幅度最大，达到 0.386 m，鲁甸地震时响应幅度最小，只有 0.005 m。

(3)弥勒县弥东哨井动水位：对尼泊尔、日本、汶川、苏门答腊和鲁甸 5 次地震的响应形态均表现为上升型。汶川地震时该井响应幅度最大，达 0.661 m，鲁甸地震时响应幅度最小，只有 0.275 m。

(4)保山滇 14 井动水位：对尼泊尔、汶川、苏门答腊和鲁甸 4 次地震的响应形态均表现为上升型。汶川地震时该井变化幅度最大，达 0.047 m，苏门答腊地震时变化幅度最小，只有 0.01 m。

3　讨论

3.1　地震波能量密度的影响

地震波能量密度是厘定地震释放能量的重要参数，利用与震级和井震距之间的相关性是现阶段获取地震波能量密度的重要方法之一。Wang 等[8]利用美国南加利福尼亚的地震数据推导得到如下的经验公式：

$$\lg r = 0.48M - 0.33\lg e - 1.4 \tag{1}$$

式中，e 为地震波能量密度，单位为 J/m^3；M 为震级；r 为井震距，单位为 km。

将表 3 中所列的 8 次地震时水温水位变化对应的震级和震中距参数带入式(1)进行回归分析。由图 6 可知，震级一定时，地震波能量密度与震中距线性拟合相关系数 R 值均大于−0.9，即能量密度与震中距明显负相关；当震中距为 500 km 时，鲁甸、芦山、汶川地震的能量密度依次增大，说明震中距一定时，地震波能量密度与震级正相关。

当地震引起的地震波能量密度达到一定阈值时，地震波作用于裂隙介质的水平剪切力会使裂隙介质中胶体等物质得到更强的疏通和迁移，致使含水层渗透系数增大，从而触发同震水温和水位响应[9-10]。

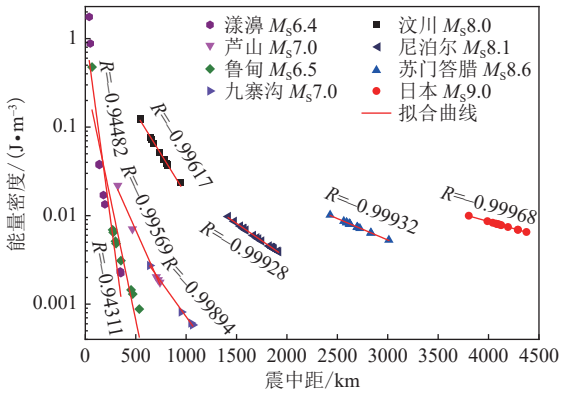


图 6　地震波能量分布与震级和震中距之间的关系

Fig. 6　Relationship between seismic wave energy distribution and magnitude and epicentral distance

Wang 等[8]在研究地震波能量密度与震级、震中距之间的关系时，认为地震波引起含水层渗透系数变化的能量密度下限约为 10^{-4} J/m^3，当地震波能量密度大于 10^{-3} J/m^3 时，地震波对裂隙的剪切作用会更强，从而能更显著地引起含水层渗透系数的变化。由表 3 计算可得，本研究中 95.5% 的地震波能量密度大于 10^{-3} J/m^3，说明 8 次地震的地震波对裂隙的剪切作用较强，能显著的引起云南井网含水层渗透系数变化。渗透系数的改变使得含水层系统内水流流程或流速(流量)和地下流体的压力发生变化，从而引起井水温度和水位的变化。

3.2　岩性对水温和水位同震响应变化的影响

岩性亦会对同震响应特征和响应幅度产生较大影响。在含水层埋深大致相同时，水位同震响应的幅度取决于观测井含水层的岩性，一般灰岩＞变质岩＞砂岩＞第四系砂砾岩，但在震中距差别很大的情况下岩性对振幅的影响可以忽略不计[11]。汶川地震时，昆明基准台 ZK1 井、建水黄龙寺井和德宏法帕滇 22 井均表现为水位震荡或上升，水温下降的响应形态(图 3)，3 口井含水层岩性均属于灰岩，地下水类型均为岩溶裂隙承压水，且井深均在 200 m 左右(表 2)。由此可知，这 3 口井的水温和水位响应形态可能受观测井含水层岩性的控制。

普洱大寨滇 17 井、弥勒县弥东哨井和保山滇 14 井(除保山滇 14 井对日本地震表现为震荡外)水位对有响应的地震均表现为上升的变化形态，表明地震导致上述 3 口井所在构造应力场压性增强张性减弱。分析发现，这 3 口观测井含水层岩性均为砂岩和粉砂岩，地下水类型均为裂隙承压水(表 2)。经查阅观测资料，排除观测系统、自然环境、场地环境和

人为等干扰因素后，本文认为引起这 3 口观测井水位有规律变化的原因是地震波加载于含水系统，与含水层发生交互作用，引起含水系统渗透性、孔隙率、空隙压力等参数的变化，从而打破了地下水系统的动态平衡，致使该井所在区域呈压性特征。

3.3 断裂对水温和水位同震响应变化的影响

断层可以为地下流体的运移提供良好的通道，同时地下流体又会对断层的活动产生一定的促进作用，二者密切相关。本次研究的观测井基本位于活动断裂带附近，多数为非自流井；地下水类型主要是岩溶裂隙承压水；92.6% 的观测井观测深度为 100～620 m，属于中等深度的观测井；分布在背斜上的昆明官渡区小哨井最深，为 2156 m，而分布在断裂交汇处的腾冲袁家塘井、下关团山井和弥渡石咀 CK2 井井深较浅(图 1，表 2)。

不同断裂上距离较近的观测井水温和水位对同一地震的响应特征不同。如相距约 20 km 的通海高大井和曲江滇 16 井对 8 次地震的同震响应形态、变化幅度和能量密度有很大差异(表 3)。本文认为，造成两口井同震响应能力差异较大的原因可能是应力的不同。

地震发生瞬间，由于局部岩石的破裂及断层的错动，一方面会使断层附近大量的流体沿破裂面迅速移动，另一方面震源区的断层滑动会使得其周围应力场发生变化，这种应力场的变化在有利条件下会触发与震源区断层存在相互作用的其他断层的活动。当一次大地震发生时，发震断层的破裂并不能引起所有断层的应力释放，而是根据断层之间的几何关系，在某些断层上造成应力卸载(释放)，使其趋于稳定，而在另一些断层上造成应力加载，使其趋于滑动[12]。曲江断裂位于哀牢山—红河断裂和鲜水河—小江断裂带向南延伸的交汇处，即川滇菱形块体东南端，应力释放强烈。对于布设在曲江断裂北盘的通海高大井和曲江隐伏断裂上的曲江滇 16 井，地震引起该地区应力场的变化作用于井-含水层系统，即地震波不同程度的改变了两个断层面上的正压力和孔隙压力，从而触发水温和水位的变化。

3.4 水温水位同震响应机理研究

相对于水位，水温的同震响应机理较复杂，时常与区域地质构造环境、水文地质条件、介质裂隙、含水层参数、探头放置的位置等因素有关[13]。本次研究中，水温水位响应特征主要有 4 种：

(1)水位震荡或上升，水温上升：如下关团山井(图 2)、弥勒县弥东哨井(图 3g 和图 3j) 和普洱大寨滇 17 井(图 3h 和图 3k)。其中，下关团山井位于红河断裂与西洱河断裂交汇处，含水层岩性以紫红色粉砂岩为主，富水性能较弱。井深 315.07 m，套管深 315.07 m，水位埋深 1.26 m，水温探头放置于距井口 290 m 深处，地下水类型为基岩裂隙承压水(表 2)。对下关团山井同震响应过程分析发现，水温响应均发生在水位响应之后 13～36 min，初步判断水温变化是由水位响应造成的。水位振荡和上升后恢复的过程使上层(井水面向下 100 m 以内)、中层(井水面向下 100～300 m 之间)和下层(井水面向下 300 m 往下)3 层井水加速对流，而在回流过程中，下层水回升到中层再到上层，因下层水温较高，导致中层水温因下层井水的混入而上升。当地震结束后，水温仍保持高值，说明此时对流达到一个平衡的状态，水温稳定。当水位同震响应结束后，上、中、下 3 层井水缓慢恢复至原来的水温。

(2)水位震荡或上升，水温下降：如昆明基准台 ZK1 井(图 3a 和图 3d)、建水黄龙寺井(图 3b 和图 3e)、德宏法帕滇 22 井(图 3c 和图 3f)。上述 3 口观测井地下水类型均为岩溶裂隙承压水，含水层岩性均为灰岩，透水性较好，在地震波的作用下，水位发生震荡使得周围温度较低的裂隙水进入观测含水层，发生水岩交互作用致使水温下降，当震荡结束后裂隙缓慢愈合，水温趋势上升。

(3)水位独立响应：如汶川地震时姚安新井(图 3s)、保山滇 14 井(图 3t)、开远滇 18 井(图 3u)和漾濞地震时姚安新井(图 4m)、楚雄新井(图 4n)均表现为水位独立响应。分析发现，上述 4 口井对其他地震的水温均没有响应，分析可能是由于水温灵敏度低或是背景噪声过大淹没了水温响应信息。

(4)水温独立响应：如漾濞地震时元谋滇 02 井(图 4o)、剑川滇 06 井(图 4p)、南华震 2 井(图 4q)和大姚地温井(图 4r)均表现为水温独立响应。结合前人经验，我们认为该异常现象可能是由固体(岩土)介质的热传导引起的，与井筒或井-含水层系统中水热运动无关，也可能是多个机理共同作用的结果[14]。

4 结论

通过对云南井网在几次地震时的响应特征分析，得出以下结论：

(1)云南井网水温和水位对汶川 M_S8.0，日本 M_S9.0，苏门答腊 M_S8.6 和尼泊尔 M_S8.1 四次远场大

震的响应较其他 4 次近震好，水位响应能力明显强于水温。水位的同震响应类型包括脉冲、振荡、上升和下降，以振荡和上升为主；水温的同震响应类型包括脉冲、上升和下降，以脉冲为主。从空间分布上看，8 次地震引起的同震响应主要集中在滇中一带。德宏法帕滇 22 井和丽江象山井有更好的响应能力，在今后的地震监测中应重点关注；剑川滇 06 井、会泽甘沟滇 01 井、昆明官渡区小哨井、大姚地温井和南华震 2 井的同震响应能力较其余 21 口井弱，未来一段时间需加强对这 5 口井的探讨。

（2）地震波能量密度与震中距线性拟合相关系数大于−0.9，成明显负相关，与震级成正相关。95.5% 的地震波能量密度大于 10^{-3} J/m^3，说明 8 次地震的地震波对裂隙的剪切作用较强，能显著的引起云南井网含水层渗透系数变化。

（3）汶川地震时，昆明基准台 ZK1 井、建水黄龙寺井和德宏法帕滇 22 井的响应形态极为相似，普洱大寨井、弥勒县弥东哨井和保山滇 14 井对有响应的地震水位均表现为上升，可能受到观测井含水层岩性的控制。另外，造成通海高大井和曲江滇 16 井同震响应能力差异较大的原因，可能是地震波不同程度的改变了两个断层面上的正压力和孔隙压力，从而触发水温和水位的变化。

（4）按响应特征对水温水位的响应机理分别进行了讨论。水位震荡或上升时水温下降和上升都是由于对流和掺混使水流所携带的井孔内热量改变造成水温变化。水位独立响应可能是由于水温灵敏度低或是背景噪声过大淹没了水温响应信息。而对于水温独立响应，我们认为该异常现象可能是由固体（岩土）介质的热传导引起的，与井筒或井-含水层系统中水热运动无关，也可能是多个机理共同作用的结果。

致谢

感谢防灾科技学院廖欣副研究员、中国科学技术大学薛红盼博士研究生、中国地震科学实验场大理中心李庆副高级工程师以及审稿专家在本文成文过程中给予的指导和帮助。

参考文献

[1] 段胜朝，张山元，番绍辉，等. 云南数字化井水位对玛多 M_S7.4 地震同震响应特征分析 [J]. 高原地震，2022，34(4)：11-20
Duan S C，Zhang S Y，Fan S H，et al. Analysis on Yunnan digital well water level to Maduo M_S7.4 earthquake co-seismic response characteristics[J]. Plateau Earthquake Research，2022，34(4)：11-20

[2] 胡小静，付虹，李涛，等. 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，2020，43(2)：340-347
Hu X J，Fu H，Li T，et al. Study on co-seismic response and prediction significance of groundwater level in the Dazhai well[J]. Journal of Seismological Research，2020，43(2)：340-347

[3] 魏海滨，谷洪彪，孔慧敏，等. 云南会泽井水位对 2014 年鲁甸 M_S6.5 地震同震响应过程模拟 [J]. 地震研究，2022，45(2)：329-339
Wei H B，Gu H B，Kong H M，et al. Modeling the coseismic response process of the water level to the 2014 Ludian M_S6.5 earthquake：A case study of Huize well[J]. Journal of Seismological Research，2022，45(2)：329-339

[4] 陶志刚，王晓，祝杰，等. 青海门源 M_S6.9 地震井水位与水温同震响应特征分析 [J]. 中国地震，2022，38(3)：399-411
Tao Z G，Wang X，Zhu J，et al. Coseismic response changes of water level and water temperature caused by the Menyuan M_S6.9 earthquake[J]. Earthquake Research in China，2022，38(3)：399-411

[5] 张立，罗睿洁，高文斐，等. 云南地下流体对尼泊尔 8.1 级地震的同震响应特征分析 [J]. 地震研究，2016，39(4)：537-544
Zhang L，Luo R J，Gao W F，et al. Analysis on coseismal response characteristic of underground fluid related to Nepal M8.1 earthquake in Yunnan[J]. Journal of Seismological Research，2016，39(4)：537-544

[6] 万迪堃，李师群，黄保大，等.“动水位”异常特征与敏感原因分析 [J]. 华北地震科学，1990，8(2)：37-46
Wan D K，Li S Q，Huang B D，et al. Analysis on the anomalous characteristics and sensitive causes of dynamic groundwater level[J]. North China Earthquake Sciences，1990，8(2)：37-46

[7] 毛巍颖. 云南思茅大寨井水位地震同震响应特征分析 [J]. 地震研究，2018，41(4)：577-582
Mao W Y. Coseismic response characteristics of water level in Simao Dazhai well，Yunnan[J]. Journal of Seismological Research，2018，41(4)：577-582

[8] Wang C Y，Manga M. Earthquakes and water[M]. Heidelberg：Springer，2010

[9] Liao X，Wang G C，Shi Z M. Sustained changes in well water levels following a large earthquake：Possible evidence of permeability decreases in a shallow groundwater system[J]. Geophysical Research Letters，2021，48(1)：e2020GL090232

[10] 钱建秀，刘春平，樊春燕，等. 地震前后井-含水层系统潮汐参数变化特征分析以云南弥勒井为例 [J]. 中国地震，2019，35(1)：169-181

Qian J X，Liu C P，Fan C Y，et al. Analysis of tidal parameters variation in the well-aquifer system before and after the earthquake：A case study of the Mile well in Yunnan Province[J]. Earthquake Research in China，2019，35(1)：169-181

[11] 周志华，黄辅琼，马玉川. 中国大陆井水位观测网对甘肃岷县漳县 6.6 级地震同震响应特征分析 [J]. 地震工程学报，2013，35(3)：529-534

Zhou Z H，Huang F Q，Ma Y C. Coseismic changes of water level caused by the Minxian-Zhangxian M_S6.6 earthquake[J]. China Earthquake Engineering Journal，2013，35(3)：529-534

[12] 杨秋野，张艳，符力耘，等. 应力变化与流体（水位、水温、水化学、土壤气等）变化的耦合机理及其在川滇地区地震前兆研究中的应用 [J]. 地球物理学进展，2020，35(6)：2124-2133

Yang Q Y，Zhang Y，Fu L Y，et al. Coupling mechanism of stress variation and groundwater (water level，water temperature，hydrochemistry，soil gas，etc.) and its application in earthquake precursors research in Sichuan and Yunnan regions[J]. Progress in Geophysics，2020，35(6)：2124-2133

[13] 巩浩波，李光科，李翠平，等. 西南地区地震观测井泉水温动态特征研究 [J]. 地球物理学进展，2021，36(4)：1393-1403

Gong H B，Li G K，Li C P，et al. Research on dynamic characteristics of water temperature in wells and springs for seismic observation in Southwest China[J]. Progress in Geophysics，2021，36(4)：1393-1403

[14] 车用太，何案华，鱼金子. 水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制 [J]. 地震学报，2014，36(1)：106-117

Che Y T，He A H，Yu J Z. Mechanisms of water-heat dynamics and earth-heat dynamics of well water temperature micro-behavior[J]. Acta Seismologica Sinica，2014，36(1)：106-117