

钟骏,周志华,马玉川,等. 2023. 2022 年 9 月 5 日四川泸定 M_s 6.8 地震引起的水温同震响应特征分析. 中国地震, 39(3): 493~501.

2022 年 9 月 5 日四川泸定 M_s 6.8 地震引起的水温同震响应特征分析

钟骏 周志华 马玉川 宋金 冯晓博 王博

中国地震台网中心,北京 100045

摘要 基于全国地下流体观测网的水温观测数据,分析 2022 年 9 月 5 日四川泸定 M_s 6.8 地震引起的水温同震响应特征,并结合同震静态应变场探讨了水温同震响应机理。结果表明,泸定 M_s 6.8 地震水温同震观测点主要分布在龙门山断裂带和川滇菱形块体中南部;震中距 $\Delta \leq 500\text{km}$ 范围内水温同震以下降—恢复型和上升型为主,水温同震项数及测项比随震中距的增加逐渐减少;水温同震响应幅度与震中距和地震能量密度显著相关,且随震中距的增加呈指数衰减,随地震能量密度的增加呈指数增大;水温同震响应持续时间主要集中在 1 天以内,持续时间随震中距的增加呈指数衰减。

关键词: 泸定 M_s 6.8 地震 水温 同震响应 机理

[文章编号] 1001-4683(2023)03-0493-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

水温同震变化是地震波作用于井-含水层系统的直接体现之一,研究水温同震响应对于理解孕震和发震过程中的应力-应变状态十分重要。自 Shimamura 等(1981)首次报道水温同震现象后,许多国内外学者对水温同震响应开展了特征和机理方面的研究(陈大庆等, 2007; 黄辅琼等; 2000; 孙小龙等, 2008; 张彬等, 2013; He et al, 2020; Wang et al, 2012)。同震响应研究不仅有助于深入认识地壳应力的动态变化过程和规律,对于捕捉地震前兆异常、判定地震趋势及减轻次生灾害等也同样具有理论和现实意义(苏鹤军等, 2020; 杨竹转等, 2005)。

据中国地震台网测定,2022 年 9 月 5 日 12 时 52 分四川泸定县(29.59°N, 102.08°E)发生 M_s 6.8 地震,该地震属于鲜水河断裂上的一次左旋走滑型地震。中国大陆多处流体观测点记录到了此次地震引起的水温同震响应现象。本文选取在此次大震中记录到同震、震后效应的水温观测点资料,对其同震响应特征进行分析讨论。

1 全国水温台网概况

中国自 1979 年开始高精度水温前兆观测探索研究,并于 1984 年在云南建立了第一个

[收稿日期] 2022-11-07 [修定日期] 2023-03-08

[项目类别] 中国地震局地震预测开放基金(XH23069D)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(2022010309)共同资助

[作者简介] 钟骏,男,1988 年生,硕士,高级工程师,主要从事地震地下流体研究。E-mail: zjadvance@126.com

水温前兆台网(付子忠,1990)。经过近40年的专业化和规范化发展,我国水温观测台站数量逐年增多,已发展成为世界上规模最大、地震监测能力最好的现代化地震地下流体观测网之一(车用太等,2017)。据刘春国等(2022)统计,纳入国家地下流体台网数据库和市县数据库管理的水温观测点(包括井和泉)分别为368个和177个,包含水温测项453项和235项,主要分布在华北、东北、东南沿海、南北地震带和天山地震带中段,总体呈现东密西疏的特点。观测仪器主要为SZW-1、SZW-1A、SZW-1AV2004、SZW-2、ZKGD3000等系列数字化水温仪,量程为0~100℃,采样率为1次/min,观测精度小于等于0.05℃,分辨力小于等于0.0001℃(陶志刚等,2022)。

2 水温同震响应特征分析

2022年9月5日四川泸定 M_s 6.8地震发生时,在全国545个观测点共计688项水温测项(部分观测点有不同深度的水温观测)中,记录到水温同震变化的观测点共29个,包含不同深度的水温观测32项,分别约占总观测点和总水温观测数量的5.3%和4.7%。这些观测点主要分布在四川、云南地区,其余零星分布在重庆、湖北、广西、湖南、海南、山西等地,基本信息见表1。

由于水温传感器不能快速响应井(泉)水温度变化,水温同震变化形态往往只有上升型和下降型两种(杨竹转,2011)。考虑到泸定 M_s 6.8地震发生后多数水温观测曲线已恢复到同震前的变化趋势(截至2022年9月10日),为便于后续分析,将全国32项水温测项记录到的同震响应类型按照震后一段时间是否恢复至震前水平划分为上升型、下降型、上升—恢复型和下降—恢复型四类(表1)。其中,上升型11项,约占同震总项数的34.4%;下降型3项,约占同震总项数的9.4%;上升—恢复型5项,约占同震总项数的15.6%;下降—恢复型13项,约占同震总项数的40.6%,同震响应类型以下降—恢复型和上升型为主。部分水温同震响应曲线如图1所示,其中,图1(a)、1(b)、1(c)为上升型,图1(d)、1(e)、1(f)为上升—恢复型,图1(g)、1(h)、1(i)为下降型,图1(j)、1(k)、1(l)为下降—恢复型。

2.1 同震空间分布特征

2022年9月5日四川泸定 M_s 6.8地震的水温同震响应范围为22~1442km,距震中最近的观测点为四川石棉川02井,最远的为山西朔州井(表1)。按震中距划分,震中距 $\Delta \leq 100\text{km}$ 范围内水温观测6项,记录同震3项,占比为50%; $100 < \Delta \leq 200\text{km}$ 范围内水温观测20项,记录同震7项,占比为35%; $200 < \Delta \leq 300\text{km}$ 范围内水温观测22项,记录同震4项,占比约为18%; $300 < \Delta \leq 400\text{km}$ 范围内水温观测26项,记录同震4项,占比约为15%; $400 < \Delta \leq 500\text{km}$ 范围内水温观测23项,记录同震4项,占比约为17%; $500 < \Delta \leq 1000\text{km}$ 范围内水温观测132项,记录同震4项,占比约为3%; $\Delta > 1000\text{km}$ 范围外水温观测459项,记录同震6项,占比约为1%(表2)。水温同震观测点主要集中在震中距 $\Delta \leq 500\text{km}$ 范围内,整体表现为水温同震项数及测项比随震中距的增加逐渐减少。

受地形和构造条件影响,震中距 $\Delta \leq 500\text{km}$ 范围内水温观测点分布不均,主要集中在龙门山断裂带、华蓥山断裂及川滇菱形块体中南部。震中距 $\Delta \leq 500\text{km}$ 范围内的水温同震分布与观测点分布大致相同,上升型、下降型和下降—恢复型主要集中在震中南部的川滇菱形块体中南部,上升—恢复型分布在震中东北部的龙门山断裂带。整体上,不同响应类型的观

表 1 泸定 $M_s6.8$ 地震水温同震响应基本信息

省份	井名	纬度 /($^{\circ}$ N)	经度 /($^{\circ}$ E)	起始时间 (时:分)	持续时间 /min	响应类型	响应幅度 / $^{\circ}$ C	震中距 /km	地震能量密度 /($J \cdot m^{-3}$)
四川	石棉川 02	29.44	102.22	12:52	1557	下降	0.8940	22	3.81×10^1
	石棉川 49	29.23	102.36	12:55	1029	下降—恢复	0.0538	48	3.58×10^0
	石棉川 50	29.22	102.37	13:06	1779	下降—恢复	0.4616	50	3.16×10^0
	宝兴川 42	30.37	102.81	12:53	39	上升	0.0120	112	2.75×10^{-1}
	西昌川 03(300m 深)	27.86	102.29	13:00	70	上升	0.0017	112	2.75×10^{-1}
	西昌川 03(500m 深)			13:03	175		0.0036		2.75×10^{-1}
	芦山川 47	30.49	103.10	13:41	22	上升—恢复	0.0008	112	2.75×10^{-1}
	芦山川 48	30.49	103.10	12:52	464	上升	0.0115	112	2.75×10^{-1}
	西昌川 32(110m 深)	27.85	102.26	12:57	275	下降—恢复	0.1002	194	5.20×10^{-2}
	西昌川 32(260m 深)			12:53	165		0.0177		5.20×10^{-2}
	泸沽湖	27.71	100.86	12:52	24	下降	0.0167	241	2.69×10^{-2}
	盐源	27.43	101.51	13:56	2352	上升	0.0032	247	2.50×10^{-2}
	会理川 31	26.70	102.20	13:07	13	上升	0.0190	322	1.12×10^{-2}
	江油川 10	31.82	104.75	13:08	163	上升—恢复	0.0012	356	8.54×10^{-3}
	会理松坪关温泉	26.34	102.98	13:04	198	上升	0.0616	372	7.23×10^{-3}
	昭通大关谢家沟	27.73	103.90	13:05	83	上升	0.0101	273	1.85×10^{-2}
昭通昭阳乐居	27.38	103.58	13:06	113	下降—恢复	0.0345	286	1.60×10^{-2}	
丽江	26.88	100.23	12:52	20	下降—恢复	0.0029	352	8.54×10^{-3}	
南华	25.20	101.30	12:54	147	下降—恢复	0.0143	494	3.06×10^{-3}	
富源猫耳脚	25.57	104.25	13:11	107	下降—恢复	0.0090	495	3.04×10^{-3}	
昆明	25.15	102.75	13:21	62	下降—恢复	0.0199	498	2.99×10^{-3}	
师宗	24.42	103.54	12:52	25	上升	0.0592	593	1.76×10^{-3}	
重庆	北碚柳荫	29.92	106.61	13:01	357	下降—恢复	0.0084	439	4.38×10^{-3}
湖北	房县三海村	31.98	110.72	13:41	1463	上升—恢复	0.0152	867	5.56×10^{-4}
广西	柳南	24.33	109.32	12:55	34	下降—恢复	0.0009	925	4.57×10^{-4}
	桂平	23.40	110.06	13:12	60	上升	0.0005	1051	3.11×10^{-4}
湖南	新宁清江	26.60	111.02	13:09	87	下降	0.0009	938	4.38×10^{-4}
	长沙	28.18	112.93	12:55	27	下降—恢复	0.0107	1068	2.96×10^{-4}
山西	临汾	36.07	111.51	12:58	16	上升—恢复	0.0024	1137	2.45×10^{-4}
	朔州	39.33	112.51	12:55	47	下降—恢复	0.0049	1442	1.19×10^{-4}
海南	三亚南滨 2 号(240m 深)	18.36	109.18	12:54	63	上升—恢复	0.0054	1441	1.19×10^{-4}
	三亚南滨 2 号(340m 深)			13:44	122	上升	0.0045		1.19×10^{-4}

测点在空间分布上无明显的四象限分布特征(图 2)。

2.2 同震响应幅度特征

四川泸定 $M_s6.8$ 地震的水温同震响应幅度范围为 $0.0005 \sim 0.894^{\circ}\text{C}$, 变幅最小的观测点为广西桂平井, 最大的为四川石棉川 02 井(表 1)。利用曲线拟合得到水温同震响应幅度 (T) 与震中距 (D) 和地震能量密度 (E) 之间的关系如图 3 所示, 泸定 $M_s6.8$ 地震的水温同震

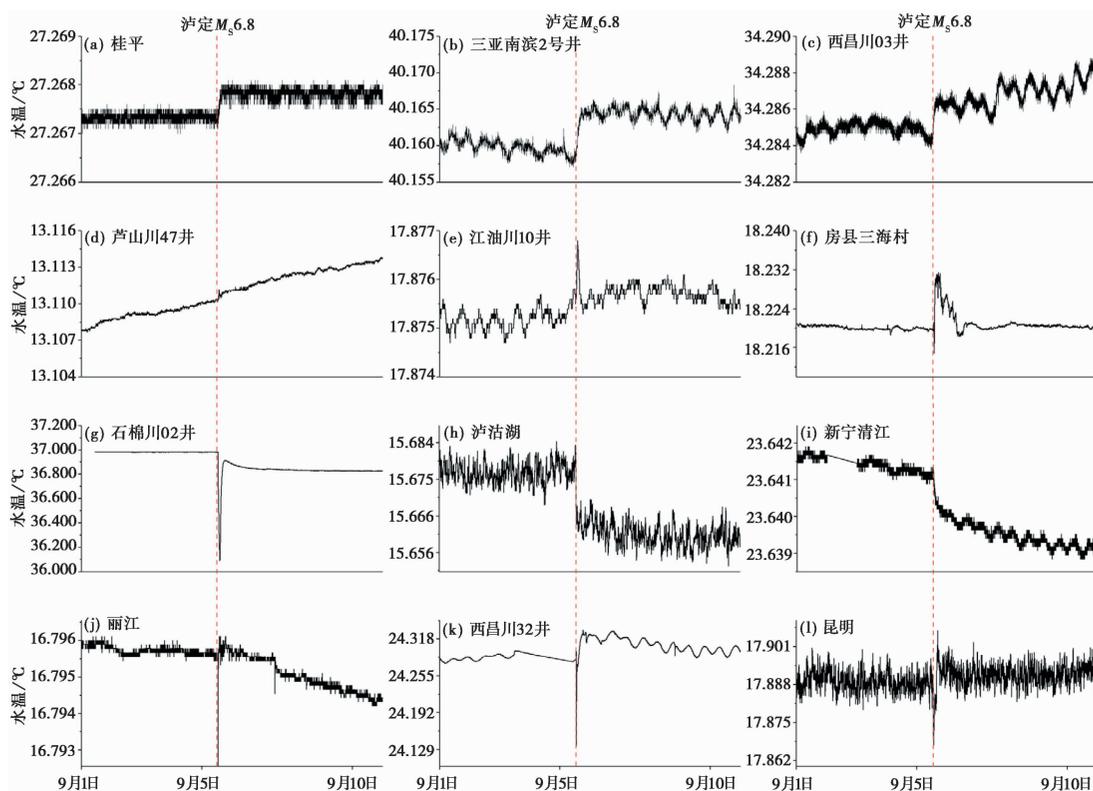


图 1 泸定 $M_s 6.8$ 地震水温同震响应曲线

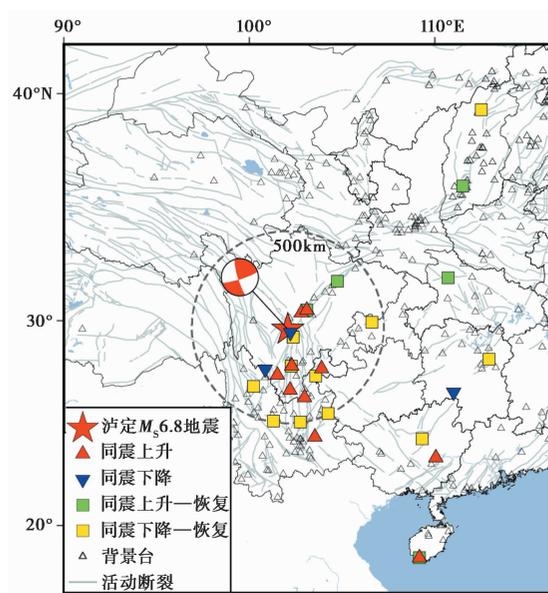
表 2 不同震中距范围内的水温观测项数、记录同震项数及其占比

震中距范围/km	观测项数/个	记录同震项数/个	占比/%
$\Delta \leq 100$	6	3	50
$100 < \Delta \leq 200$	20	7	35
$200 < \Delta \leq 300$	22	4	18
$300 < \Delta \leq 400$	26	4	15
$400 < \Delta \leq 500$	23	4	17
$500 < \Delta \leq 1000$	132	4	3
$\Delta \geq 1000$	459	6	1

响应幅度与震中距、地震能量密度相关性显著,相关系数 R 分别为 0.93 和 0.94。不同的是,水温同震响应幅度随震中距的增加呈指数型衰减,在距震中约 364km 处衰减至接近中位数 0.0104°C 水平(图 3(a)); 而其随地震能量密度的增加呈指数型增大,当地震能量密度大于 10^{-1} J/m^3 时,水温同震响应幅度显著增大(图 3(b))。

2.3 同震响应时间特征

截至 2022 年 9 月 10 日,四川泸定 $M_s 6.8$ 地震的水温同震响应持续时间范围为 13~2353min,持续时间最短的观测点为四川会理川 31 井,最长的为四川盐源井(表 1)。按



注: 震源机制来自全球质心矩张量数据库(GCMT)。

图2 泸定 M_s 6.8地震水温同震响应空间分布

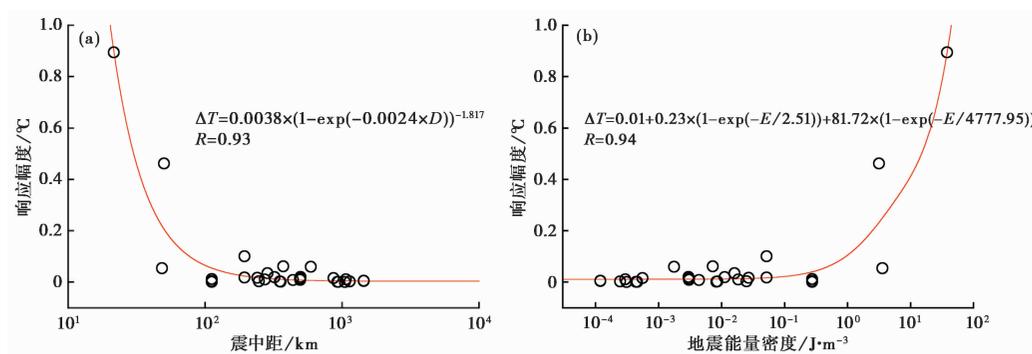


图3 泸定 M_s 6.8地震水温同震响应幅度与震中距(a)及地震能量密度(b)的关系

照响应持续时间划分,持续时间在 0~60min 范围内 11 项,占比约 34.4%;1~24h 范围内 17 项,占比约 53.1%;1 天以上 4 项,占比约 12.5%,水温同震响应持续时间主要集中在 1 天以内,占比约 87.5%(图 4(a))。持续时间(t)与震中距(D)的拟合结果显示(图 4(b)),泸定 M_s 6.8 地震的水温同震响应持续时间与震中距呈显著的指数相关,相关系数(R)为 0.90,响应持续时间随震中距的增加而快速减小,在距震中约 226km 处衰减至接近中位数 97min。

3 讨论与结论

强震的发生会促使区域构造应力更加集中,当积累的应力超过断裂破裂强度时会触发下次地震的发生(潘家伟等,2022)。地震学者通过研究流体同震变化特征与未来地震的关系发现,流体上升或下降变化的空间集中区可能与未来地震的震中有关(陈大庆等,2007;

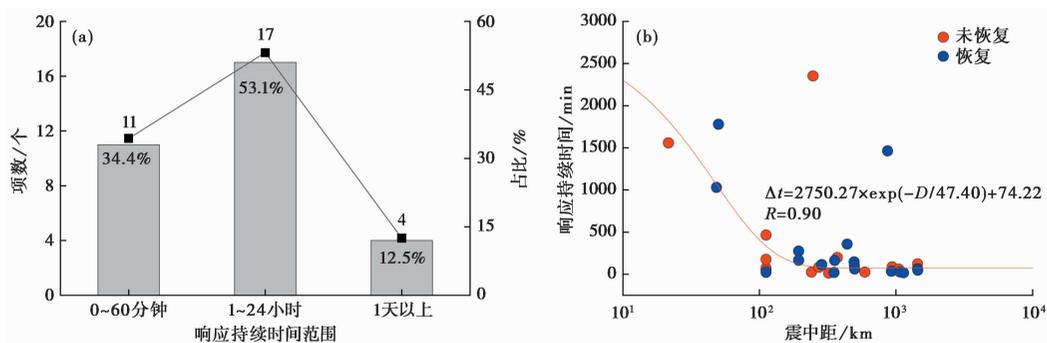


图4 泸定 $M_s6.8$ 地震水温同震响应持续时间分布范围(a)及同震响应持续时间与震中距的关系(b)

付虹等,2002;廖丽霞等,2009;刘耀炜等,2009;苏鹤军等,2020)。因此,研究同震形态的空间分布特征及响应机理对未来地震发生地点的预测具有一定的参考意义。

基于 Okada (1992) 有限矩形源模型计算泸定 $M_s6.8$ 地震的同震静态应变场,结果显示,泸定 $M_s6.8$ 地震引起的水温同震响应与同震破裂体应变四象限分布较为吻合,表现为水温同震上升和上升—恢复响应基本处于同震体应变压缩的区域,同震下降和下降—恢复响应多分布在同震体应变膨胀的区域。此外,同震体应变压缩的区域同样分布有一定数量的水温同震下降—恢复响应(图5)。反观水位资料,泸定 $M_s6.8$ 地震引起的水位同震响应与同震破裂体应变的四象限分布不太吻合,但大多数水位同震上升响应分布在同震体应变压缩的区域,侧面印证了水温同震上升所在区域挤压作用明显。在同震应变场不同区域还存在一定数量与区域应变状态相反的水位同震响应,即同震体应变压缩的区域井水位下降,同震体应变膨胀的区域井水位上升(图5)。造成这种不同同震现象的原因和机理较为复杂,尤其是水温同震响应。从当前的研究成果来看,水温同震变化与水的作用密切相关,不仅仅是

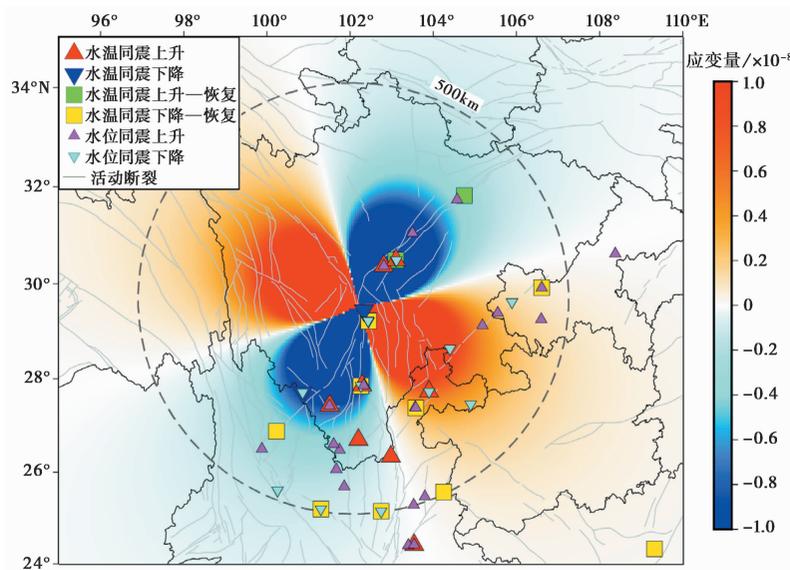


图5 泸定 $M_s6.8$ 地震同震静态应变场分布

简单地由水位同震变化引起,还与水流特征、含水层特征、井孔结构以及温度梯度等水-热动力学因素有关(车用太等,2014)。

目前,基于水-热动力学过程较为成熟的水温同震响应机理解释分为 3 种:①水位同震振荡时,温度较高的高分子动能的水与温度较低的低分子动能的水互相弥散,在一定条件下形成同震水温升高或降低现象(石耀霖等,2007);②井水位在地震波作用下发生上、下振荡,促使井孔内不同温度的水发生热对流,在正水温梯度下,温度传感器放置在井孔下半部时会记录到水温下降,放置在井孔上半部时则会记录到水温上升;在负水温梯度下,则相反(车用太等,2014);③应力作用下含水层参数发生改变,含水层中固体骨架吸附的气体和热水中溶解的气体随着水位振荡加速向外逃逸,在这个过程中携带了大量热量而造成水温的下降(鱼金子等,1997)。以上水温同震机理往往局限于理想状态下简单的井-含水层水文地质模型,但考虑到不同井孔所处水文地质条件不同,同一力学作用下各含水层对井水温度或热变化的贡献不同,再加上温度传感器放置深度不同,水温同震响应现象可能是不同机理共同作用的结果(车用太等,2014)。

结合前人提出的多种不同水温同震响应机理,分析认为本次水温同震现象可能与含水层系统在地震波的作用下原有的水-热动力学动态平衡被打破有关。相关研究表明,当地震能量密度大于 10^{-4}J/m^3 的阈值时,地震波能够引起含水层渗透性发生变化(Sun et al, 2021; Wang et al, 2010)。泸定 $M_s 6.8$ 地震在距震中距 $\Delta \leq 500 \text{km}$ 处的地震能量密度达到 $2.9 \times 10^{-3} \text{J/m}^3$, 接近阈值的 30 倍,可以引起含水层渗透性发生显著变化。如含水裂隙出现弹-塑性的张开和闭合,或含水裂隙被冲开或被堵塞,甚至造成新的裂隙,从而形成流体在含水层中水平和垂向的运移(刘耀炜,2009)。由于地温梯度的存在,流体的流动引起热对流和传导,进而表现为温度的变化。震后一段时间,一部分井的水温会随含水层渗透性的恢复逐渐恢复至震前水平;而另一部分井可能由于不同温度的含水层在应力的强烈作用下产生了永久性的水力连通,导致较高温度的含水层持续补给井孔所在的低温含水层,或者较低温度的含水层持续补给井孔所在的高温含水层,从而表现出井孔内水温上升或下降后无法恢复至震前水平(Ma, 2016)。因此,结合挤压区内水位同震上升响应密集分布的特点,认为水温同震上升或下降—恢复响应可能也是应力相对集中的一种体现,这些观测点所在的川滇菱形块体中南部以及龙门山断裂带可能是未来地震发生的优势地点。

通过对泸定 $M_s 6.8$ 地震水温同震响应特征分析,得出以下结论:

(1) 泸定 $M_s 6.8$ 地震引起的水温同震观测点主要集中在震中距 $\Delta \leq 500 \text{km}$ 范围内,同震项数及测项比随震中距的增加逐渐减少,同震响应分布主要集中在龙门山断裂带和川滇菱形块体中南部,以下降—恢复型和上升型为主。

(2) 水温同震响应幅度与震中距和地震能量密度相关性显著,水温同震响应幅度随震中距的增加呈指数型衰减,而其随地震能量密度的增加呈指数型增大。

(3) 水温同震响应持续时间主要集中在 1 天以内,其与震中距呈显著的指数相关,随震中距的增加而快速减小。

参考文献

车用太,何案华,冯恩国,等. 2017. 从二个地下流体典型震例论台网优化与升级. 地震, 37(1): 134~147.

- 车用太,何案华,鱼金子. 2014. 水温微动态形成的水热动力学与地热动力学机制. 地震学报, **36**(1):106~117.
- 陈大庆,刘耀炜,杨选辉,等. 2007. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究. 地震地质, **29**(1):122~132.
- 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. 地震, **22**(4):55~66.
- 付子忠. 1990. 澜沧-耿马 7.6 级地震的地热前兆异常. 见:国家地震局地壳应力研究所,地壳构造与地壳应力文集(4). 北京:地震出版社.
- 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. 地震, **20**(增刊 I):119~125.
- 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. 地震学报, **31**(4):432~441.
- 刘春国,晏锐,樊春燕,等. 2022. 我国地震地下水流体监测现状分析及展望. 地震研究, **45**(2):161~172.
- 刘耀炜. 2009. 动力加载作用与地下水物理动态过程研究. 博士学位论文. 北京:中国地质大学(北京).
- 刘耀炜,任宏微. 2009. 汶川 8.0 级地震氦观测值震后效应特征初步分析. 地震, **29**(1):121~131.
- 潘家伟,李海兵, Chevalier M L 等. 2022. 2022 年青海门源 M_s 6.9 地震地表破裂带及发震构造研究. 地质学报, **96**(1):215~231.
- 石耀霖,曹建玲,马丽,等. 2007. 唐山井水温的同震变化及其物理解释. 地震学报, **29**(3):265~273.
- 苏鹤军,曹玲玲,张慧,等. 2020. 近场水位、水温同震响应特征及对地震的预测. 地震工程学报, **42**(1):98~106.
- 孙小龙,刘耀炜. 2008. 塔院井水位和水温的同震响应特征及其机理探讨. 中国地震, **24**(2):105~115.
- 陶志刚,刘春国. 2022. 地下流体井水温数据质量评价指标探讨. 地震研究, **45**(2):340~344.
- 杨竹转. 2011. 地震波引起的井水位水温同震变化及其机理研究. 博士学位论文. 北京:中国地震局地质研究所.
- 杨竹转,邓志辉,赵云旭,等. 2005. 云南思茅大寨井水位同震阶变的初步研究. 地震学报, **27**(5):569~574.
- 鱼金子,车用太,刘五洲. 1997. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究. 地震, **17**(4):389~396.
- 张彬,刘耀炜,杨选辉. 2013. 中国大陆井水温对汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级和岷县 6.6 级地震响应特征的对比研究. 地震工程学报, **35**(3):535~541.
- He A H, Singh R P. 2020. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake. *Pure Appl Geophys*, **177**(1):109~120.
- Ma Y. 2016. Earthquake-related temperature changes in two neighboring hot springs at Xiangcheng, China. *Geofluids*, **16**(3):434~439.
- Okada Y. 1992. Internal deformation due to shear and tensile faults in a half space. *Bull Seismol Soc Am*, **82**(2):1018~1040.
- Shimamura H, Watanabe H. 1981. Coseismic changes in groundwater temperature of the Usu volcanic region. *Nature*, **291**(5811):137~138.
- Sun X L, Xiang Y. 2021. Aquifer permeability decreases before local earthquakes inferred from water level response to period loading. *Geophys Res Lett*, **48**(15):e2021GL093856.
- Wang C Y, Manga M. 2010. Hydrologic responses to earthquakes and a general metric. *Geofluids*, **10**(1~2):206~216.
- Wang C Y, Manga M, Wang C H, et al. 2012. Transient change in groundwater temperature after earthquakes. *Geology*, **40**(2):119~122.

Analysis on Coseismic Response Characteristics of Water Temperature Caused by the Sichuan Luding $M_s6.8$ Earthquake in 2022

Zhong Jun, Zhou Zhihua, Ma Yuchuan, Song Jin, Feng Xiaobo, Wang Bo

China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

Abstract Based on the water temperature observation data of the national underground fluid observation network, this paper analyzed the characteristics of the water temperature coseismic response caused by the Sichuan Luding $M_s6.8$ earthquake on September 5, 2022, and discussed the mechanism of the water temperature coseismic response related with the coseismic static strain field. The results show that the water temperature coseismic observation points of the Luding $M_s6.8$ earthquake are mainly distributed in the Longmenshan fault belt and the central south of the rhombus block in Sichuan and Yunnan Provinces. In the range of epicentral distance $\Delta \leq 500\text{km}$, coseismic responses are dominant by patterns of decline-recovery and rise. The number of water temperature coseismic factors and their ratio gradually decrease with the increase of the earthquake epicentral distance. The coseismic response amplitude of water temperature is significantly related to the epicentral distance and seismic energy density, showing exponential decay with the increase of epicentral distance while increasing exponentially with the increase of seismic energy density. The duration of the water temperature coseismic response is mainly within one day and decreases exponentially with the increase of epicentral distance.

Keywords: The Luding $M_s6.8$ earthquake; Water temperature; Coseismic response; Mechanism