

芮雪莲, 杨耀, 官致君, 等. 2022. 四川理塘毛垭 51 泉水温在青藏高原东南缘中强地震前的异常特征及机理分析[J]. 地震研究, 45(2): 318–328, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0040.

Rui X L, Yang Y, Guan Z J, et al. 2022. Anomaly characteristics of the water temperature of Maoya, Litang 51th spring before the mid-strong earthquakes in the southeastern Tibetan Plateau and its precursor mechanisms[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 318–328, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0040.

## 四川理塘毛垭 51 泉水温在青藏高原东南缘 中强地震前的异常特征及机理分析\*

芮雪莲<sup>1</sup>, 杨耀<sup>1,2\*</sup>, 官致君<sup>1</sup>, 杜方<sup>1</sup>, 薛乔文<sup>3</sup>, 龙锋<sup>1</sup>, 杨星<sup>1</sup>, 杨鹏<sup>1</sup>

(1. 四川省地震局, 四川 成都 610041; 2. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610041;

3. 甘孜州应急管理局, 四川 康定 626099)

**摘要:** 采用四川理塘毛垭 51 泉 46 年的人工观测水温数据, 结合区域水文地质、水文地球化学、气象等资料, 分析了水温的基本动态特征、水温异常的映震特征及其在漾濞  $M_s6.4$  地震前的异常变化, 并初步讨论了异常机理。结果表明: 理塘毛垭 51 泉水温在不同背景温度下的震前水温上升幅度指标存在差异, 2009 年以来温泉变为低温温泉, 水温上升异常阈值由原  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  降低为  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。理塘毛垭 51 泉具有深循环特征, 且处于构造交汇部位, 水温异常变化能够反映地壳深度热流和构造活动信息, 对青藏高原东南缘中强震具有较好的预测效能, 优势预测区域为川滇交界西侧。

**关键词:** 理塘毛垭 51 泉; 水温异常; 漾濞  $M_s6.4$  地震; 理塘断裂带

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2022)02-0318-11

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0040

### 0 引言

水温监测是地震异常监测的一种重要手段, 通过对深井、温泉水温变化的观测与分析, 探讨在构造应力作用下热物质运移、介质能量转化和水动力条件改变引起的地壳介质温度变化过程(刘耀伟, 2006), 目的是捕捉其在地震孕育、发展和发生过程中的“信号”(张彬等, 2014)。我国自 1979 年开始开展地震地热前兆相关的研究工作(刘耀伟, 2006), 经过数十年的积累, 获得了丰富的水温前兆异常资料, 积累了大量的震例。

张彬等(2014)总结了云南地区水温异常与地震的关系, 并将震前水温异常形态分为降温型、升温型和畸变型, 认为水温异常主要属于地震短临异常, 且发震震级越大, 异常范围越广; 晏锐等(2015)研究认为川西多个温泉水温在 2013 年芦山  $M_s7.0$  地震前均出现了不同程度的异常变化, 且距震中较远的温泉表现为中期尺度异常, 较近的则表现为短期异常; Ma(2016)研究认为乡城 52 泉水温在 1993 年中旬  $M_s5.8$  地震前 13 d 明显上升, 表现出短临异常的特征; 云南龙陵邦腊掌温泉水温在 1976 年龙陵  $M_s7.3$ 、 $M_s7.4$  地震前一个多月突升  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 表现出明显的短临异常特征, 震

\* 收稿日期: 2022-02-22.

**基金项目:** 国家重点研发计划——人工智能地震综合预测和应用示范(2021YFC3000705)、中国地震局地震星火科技项目(XH202301Y)、中国地震局震情跟踪定向工作任务(2021010310)和四川省地震局地震科技专项(LY2002)联合资助。

**第一作者简介:** 芮雪莲(1990-), 工程师, 主要从事地震地下流体分析预测及研究. E-mail: scdzarui@163.com.

**通讯作者简介:** 杨耀(1987-), 工程师, 主要从事地震地下流体分析预测及研究、流体地球化学研究。

E-mail: yangyao\_cdut@163.com.

例总结分析表明, 该泉水温在震前一个月左右偏离背景值上升至 90 ℃ 直至地震发生 (李加稳, 孙文波, 2004); 邓卫平等 (2019) 通过梳理全国水温台网数据, 认为 2008 年汶川  $M_s8.0$  地震前井水温度有一定异常, 且分布范围较广, 一半观测井的震中距超过 1 000 km, 异常多表现为短临异常特征, 这与王军等 (2018) 的研究结果一致。此外, 2007 年宁洱  $M_s6.4$  (刘耀炜等, 2008)、2010 年玉树  $M_s7.1$  (何案华等, 2012; 杨晓霞, 屠泓为, 2013)、2014 年鲁甸  $M_s6.5$  (杨竹转等, 2018)、2016 年门源  $M_s6.5$  (杨晓霞等, 2016)、2021 年漾濞  $M_s6.4$  (付虹等, 2021; 马玉川等, 2021) 和 2021 年玛多  $M_s7.4$  (刘磊等, 2021; 苏维刚等, 2021) 等中强地震前均有水温异常。由于水温受水的运动、气的运动、地热活动性等多方面影响, 观测机理较为复杂, 目前对于水温异常与地震关系的研究大多数集中在对异常特征的总结, 对于水温应力加载响应机理的研究相对滞后, 目前国内学者提出的主要模式有: 地下热异常上升模式 (王林瑛, 朱传镇, 1984)、温室效应模式 (强祖基等, 1997)、水动力学模式 (鱼金子等, 1997)、应力耗散模式 (王庆良等, 1998) 等。

川西地区温泉观测环境较好, 温泉水具有深循环特征, 能够反映地壳深部及构造变化信息, 对区域地震预测研究具有重要的科学和现实意义 (晏锐等, 2015)。其中, 理塘毛垭 51 泉是川西温泉中映震率较高的温泉, 震例统计表明, 该温泉异常与川滇地区强震活动之间存在较好的对应关系 (李军等, 2005; 晏锐等, 2015; 邱桂兰等, 2019)。前人分别从水文地球化学、气体地球化学 (李军等, 1989; Zhou *et al.*, 2017)、水温动态特征 (赵庆生等, 1989)、地质构造 (龙德雄等, 2006) 等方面对该温泉开展了较为详细的研究。贾晋康等 (1996) 对 1995 年毛垭温泉的水温大幅下降的特大异常进行了调查与分析, 认为此次异常属于温泉发育中的变化, 来自深层循环的裂隙上升泉本身就存在着生产—调整—消亡的过程, 其测值极有可能反应了大震孕育信息; 李介成 (1983) 认为 1980 年毛垭泉水温曲线上升幅度明显增大是 1981 年道孚  $M_s6.9$  地震的前兆异常; Zhou 等 (2015) 对毛垭温泉逸出气体开展了地球化学分析, 结果表明理塘断裂

带为地幔深部流体的上涌提供了良好的通道, 这些幔源流体对周边中强地震的孕育有重要作用。以往有关该温泉水温的研究缺乏对该温泉的历史资料、映震特征 (包括时间、空间特征) 和水温异常机理系统的梳理。2021 年 5 月 21 日, 云南漾濞县发生  $M_s6.4$  地震, 理塘毛垭 51 泉水温在此次地震之前出现显著的前兆异常, 本文拟结合区域地质构造、水文地球化学、气象数据等资料探讨在漾濞  $M_s6.4$  地震前理塘毛垭 51 泉的水温异常特征及可能的异常形成机理。

## 1 构造背景

距今 60 ~ 50 Ma 前, 印度—亚洲板块碰撞造成青藏高原的隆升, 碰撞之后, 板块之间仍持续汇聚, 印度板块仍然以 44 ~ 50 mm/a 的速率俯冲到亚洲板块之下, 从而形成了喜马拉雅造山带及几百万平方千米的巨型变形域, 青藏高原东部的挤压作用导致川滇菱形块体的形成 (许志琴等, 1999, 2006; 张培震, 2008)。

川滇菱形块体位于青藏高原东南部, 块体及周边区域活动断裂结构复杂, 构造活动剧烈, 是中国大陆地震活动最强烈的地区之一 (图 1)。有历史记载以来该区共发生 7 级以上强震 23 次, 块体北段历史上曾发生过 7 级以上地震 3 次, 并有大量 6 级左右地震发生 (张培震等, 2003), 理塘毛垭 51 泉位于该块体的中北部。研究区内 (图 1b) 主要发育 SN 向金沙江断裂带、NW 向的理塘断裂带和一些近 EW 向的次级断裂, 理塘断裂带也是调整青藏高原内部物质向东挤出的重要活动断裂之一 (周春景等, 2015; 刘亢等, 2021)。发育于理塘盆地内部的 NW 向义敦—理塘、理塘—德巫断裂属于川滇菱形构造块体内部的活动断裂, 这些活动断裂具有较强烈的晚第四纪及现今活动性, 平均左旋滑动速率为 4 mm/a (徐锡伟等, 2005)。理塘断裂带南段的理塘—德巫断裂活动性明显较北段显著, 义敦—理塘、理塘—德巫断裂左旋切割了 SN 向的甘孜—理塘—稻城断裂带及三叠纪等的沉积地层 (龙德雄等, 2006; 马丹等, 2014)。理塘毛垭 51 泉处于义敦—理塘、理塘—德巫断裂与甘孜—理塘—稻城断裂的交汇部位, 是比较理想的温泉水温观测点。

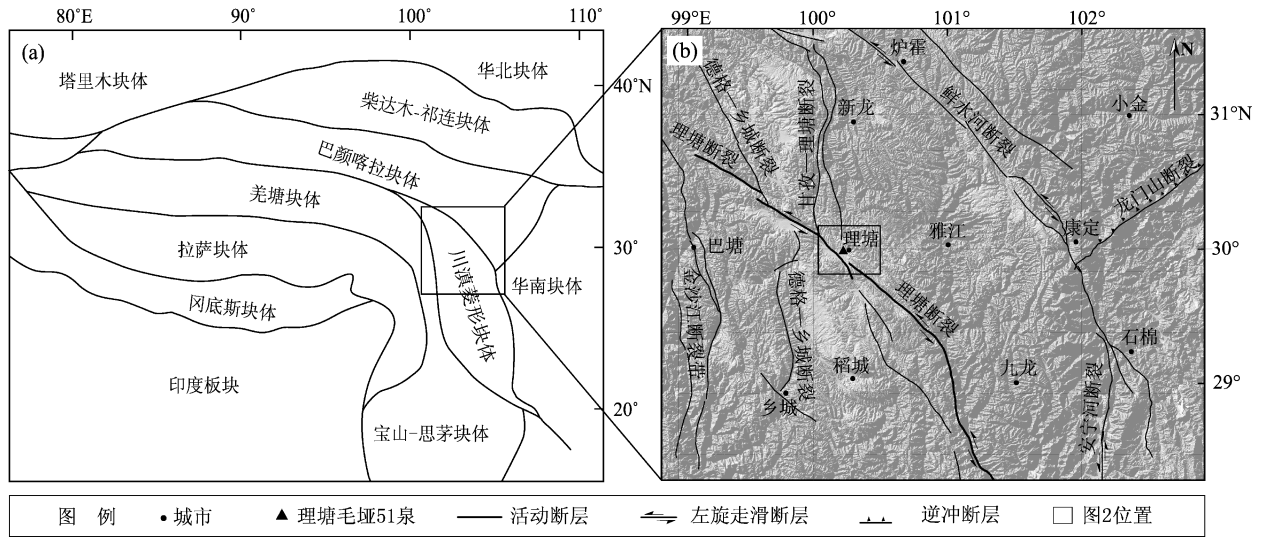


图1 研究区域大地构造背景 (a) 与观测点 (b) 示意图

Fig. 1 The schematic diagram of tectonic settings (a) and observation station (b) in the study area

理塘毛垭 51 泉附近出露的地层主要有：上三叠统、古近系、第四系和印支期花岗岩等地层（图 2）。上三叠统主要为一套复理石沉积建造，岩性为变质石英砂岩、板岩、灰岩和硅质岩等。古近系主要为冲洪积成因的砾岩、砂砾岩。第四系

地层主要沿理塘—德巫断裂带或无量河北东侧分布（龙德雄等，2006）。理塘毛垭 51 泉西侧展布有大型条带状中生代早期花岗岩体，研究认为沿甘孜—理塘—稻城构造带，三叠纪侵入到中上地壳的酸性花岗岩岩浆和喷出到地表的火山岩为中上地壳残余的岩浆囊或高温地质体，这些是该地区形成温泉群的主要热源之一（李军等，2005；龙德雄等，2006）。

## 2 水温历史资料分析

理塘毛垭 51 泉于 1975 年 2 月开始成为地震部门的观测点，于 1985 年经国家地震局验收后纳入国家地震局地下水观测网（李军等，2005）。2013 年该测点新增数字监测，观测仪器型号为中科光大 ZKGD3000。目前该泉同时开展人工和数字化水温观测，采样率分别为日值、分钟值。由于人工观测数据累计时间较长，资料比较丰富，故本文仅使用理塘毛垭 51 泉人工观测数据开展相关分析研究。

自开展观测以来，理塘毛垭 51 泉水温在时间上表现为阶段性特征（赵庆生等，1989）：1975 年 1 月至 2008 年 12 月温泉水温较高，保持在 40℃ ~ 66.1℃，为中温温泉（1995 年 8 月至 1997 年 2 月温泉断流无数据），2009 年 1 月至 2017 年 2 月，该温泉水温变化范围为 32℃ ~ 41℃，变为低温温泉，2017 年 2 月至今温泉水温长期保持低于 32℃，2020、2021 年最低温度仅有 17.4℃（图 3a）。

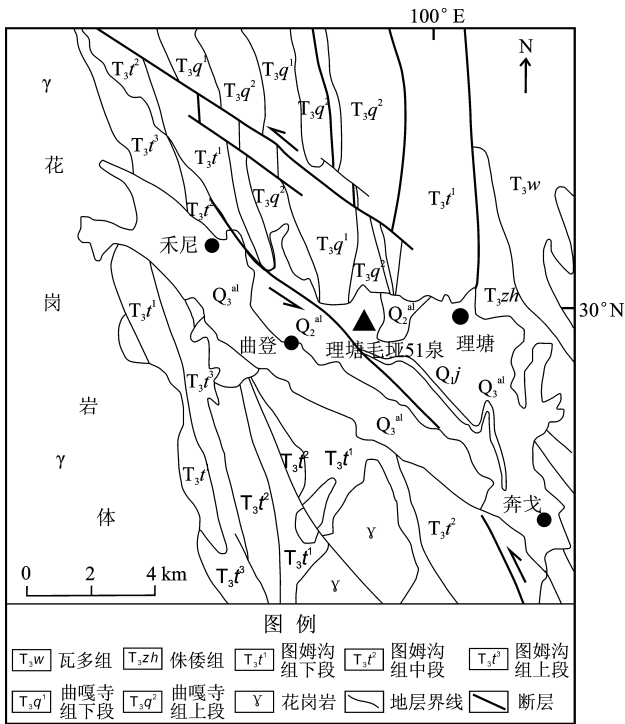


图2 理塘毛垭 51 泉测点地质构造图（据郑裕民，1984；龙德雄等，2006）

Fig. 2 Geological structure map of Maoya, Litang 51th spring area (based on Zheng, 1984; Long et al, 2006)

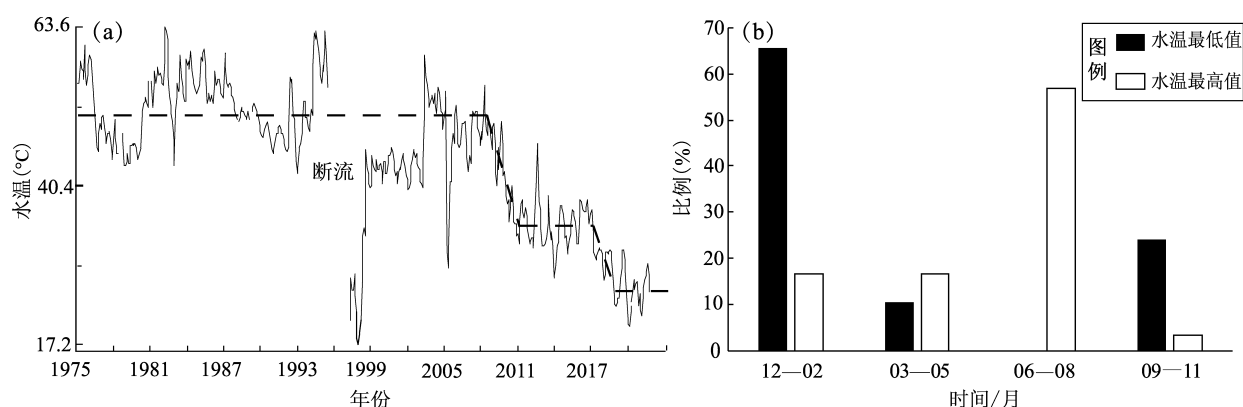


图3 理塘毛垭 51 泉水温月均值时序曲线 (a) 及水温特征统计 (b)

Fig. 3 Monthly mean values (a) and statistical graph (b) of the water temperature of Maoya, Litang 51th spring

理塘毛垭 51 泉水温月均值时序曲线 (图 3a) 表明, 该泉水温变化有以年为周期的规律, 具体表现为 1—6 月水温整体逐步升高, 夏季 (6—8 月) 水温整体保持在相对高的水平, 9—12 月水温呈现下降的趋势, 多年数据统计结果表明温泉水温高值多在 6—8 月, 约为 57%, 水温低值多在 12 月至次年 2 月, 为 66% (图 3b)。水温正常波动情况下平均年变化幅度为 8.3 °C。

### 3 数据处理及异常提取

#### 3.1 数据处理方法

本文选取 1975 年 2 月 1 日至 2021 年 10 月 31 日理塘毛垭 51 泉水温人工观测日值数据, 在 46 年多的观测时间内, 除 1995—1997 年由于温泉断流造成观测数据缺失较多外, 其余时间观测资料连续可靠, 完全满足本文研究的要求。

本文采用一阶差分的方法对以上观测数据进行分析。一阶差分是抑制较长周期、突出短临前兆信息的有效方法, 表示曲线变化的速率, 可能反应了地壳介质应力变化过程中的较高频的扰动部分, 多属短临异常。理塘毛垭 51 泉人工观测水温数据为每日一值序列  $\{T_i\}$ ,  $(i = 1, 2, \dots, n)$ , 对该序列按照下式进行一阶差分计算:

$$\Delta T_i = T_{i+2} - T_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:  $T_i$  为水温观测值;  $\Delta T_i$  为水温观测值两天的差值, 即水温变化速率, 若  $\Delta T_i > 0$  表示水温观测值相对上升,  $\Delta T_i < 0$  则表示相对下降。

#### 3.2 异常提取

研究表明温泉水温异常在震前多表现为温度升

高 (刘耀炜等, 2008; 晏锐等, 2015), 结合前人研究结果 (李介成, 1983; 李军等, 1989, 2005) 及不同时段内温泉水温的平均温度, 本文定义理塘毛垭 51 泉水温异常标准为: 根据式 (1) 计算该温泉日值数据, 1975 年 2 月至 2008 年 12 月异常阈值为  $\Delta T_i = 8.0$  °C; 2009 年至今, 考虑到该泉的水温背景值降低, 异常阈值则相应降低至  $\Delta T_i = 6.0$  °C。根据以上异常标准将时间连续的超阈值异常视为一组水温上升异常, 最终得到理塘毛垭 51 泉水温上升幅度超阈值异常共计 29 次 (图 4)。

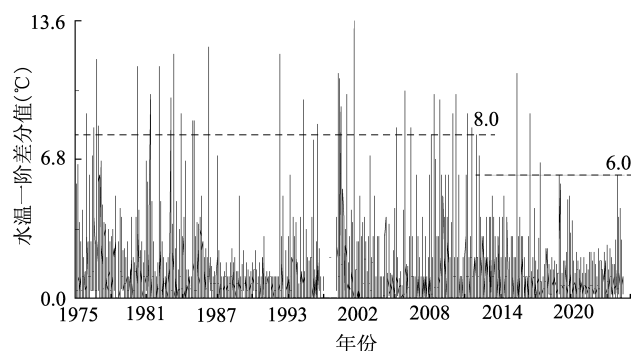


图4 理塘毛垭 51 泉水温一阶差分结果

Fig. 4 The first - order difference graph of the water temperature of Maoya, Litang 51th spring

### 4 水温异常特征分析

#### 4.1 中短期异常映震特征分析

为了研究理塘毛垭 51 泉水温异常变化与周边地震之间的关系, 本文选取 1975 年 2 月—2020 年 12 月青藏高原东南缘  $M_s \geq 5.5$  地震共 33 次 (不含余震, 1995—1997 年由于温泉断流, 该时间段内

发生的地震未统计在内) 开展统计分析工作。根据 3.2 节提取的水温异常结果, 对其后发生的地震

及对应情况进行梳理, 结果见表 1。图 5 显示在提取的 29 次异常中有 11 次异常有效期内无对应地震

表 1 理塘毛垭 51 泉水温异常及对应地震统计

Tab. 1 Temperature anomalies of Maoya, Litang 51th spring and the corresponding earthquakes

序号	异常起始日期	异常上升幅度 (°C)	对应地震	震中距离/km	异常开始距发震时间/d
1	1976-07-12	9.3	1976 年 8 月 23 日四川松潘 $M_S7.2$	460	42
2	1976-09-28	11.7			40
3	1976-10-21	8.0	1976 年 11 月 7 日四川盐源 $M_S6.7$	280	17
4	1982-02-18	11.3	1982 年 6 月 16 日四川甘孜 $M_S6.0$	190	118
5	1984-12-21	8.7			118
6	1985-01-29	8.7	1985 年 4 月 18 日云南禄劝 $M_S6.3$	526	79
7	1986-03-22	12.3	1986 年 8 月 7 日四川理塘 $M_S5.6$	86	138
8	1998-08-08	13.6	1998 年 11 月 19 日云南宁蒗 $M_S6.2$	317	103
			2003 年 7 月 21 日云南大姚 $M_S6.2$	456	29
9	2003-06-22	8.3	2003 年 10 月 16 日云南大姚 $M_S6.1$	459	116
10	2006-12-27	9.0			131
11	2007-03-11	10.0	2007 年 5 月 7 日西藏妥坝 $M_S5.6$	287	57
12	2008-03-27	9.0	2008 年 5 月 12 日四川汶川 $M_S8.0$	325	46
13	2008-08-12	8.3	2008 年 9 月 30 日四川攀枝花 $M_S6.1$	441	49
14	2008-12-03	8.0	2009 年 7 月 9 日云南姚安 $M_S6.0$	500	278
			2012 年 6 月 24 日云南盐源 $M_S5.7$	258	15
15	2012-06-09	11.0	2012 年 9 月 7 日云南彝良 $M_S5.7$	464	90
			2013 年 8 月 31 日四川得荣 $M_S5.9$	216	48
16	2013-07-14	9.0	2013 年 8 月 12 日西藏左贡 $M_S6.1$	212	29
			2014 年 8 月 3 日云南鲁甸 $M_S6.5$	442	68
17	2014-05-27	6.6	2014 年 11 月 22 日四川康定 $M_S6.3$	147	179
18	2020-12-20	6.0	2021 年 5 月 21 日云南漾濞 $M_S6.4$	480	152

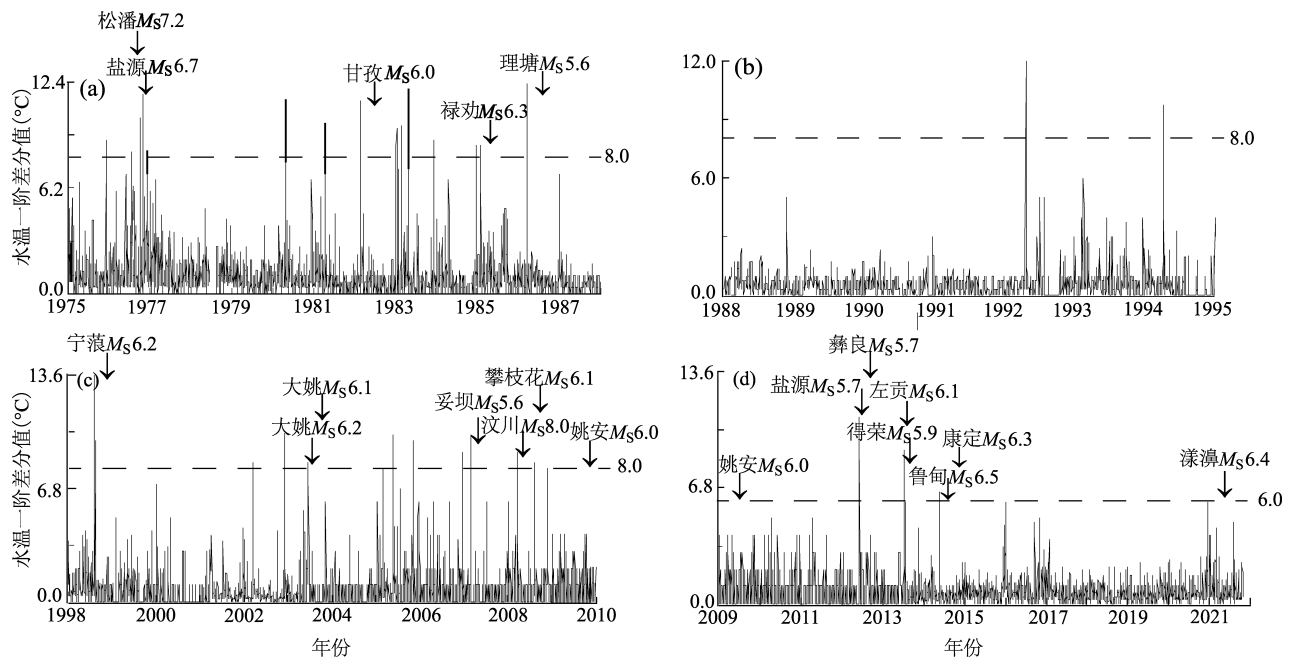


图 5 不同时段内理塘毛垭 51 泉水温异常与地震对应关系图

Fig. 5 Temperature anomalies of Maoya, Litang 51th spring and the corresponding earthquakes during different periods

发生。水温虚报主要集中在 1976—1983 年, 虚报数为 7, 占有虚报数的 64%。2009—2020 年理塘毛垭 51 泉水温达到异常阈值后均有地震对应, 且其中 3 次异常后, 短时间内预测区均发生了 2 次  $M_s \geq 5.5$  地震。此外, 水温一阶差分值超阈值幅度与地震震级之间无明显的对应关系。

表 1 显示, 理塘毛垭 51 泉水温异常和地震除了一一对应关系外, 还存在以下特征: ①一次地震前有 2 次水温异常。如四川盐源  $M_s 6.7$ 、云南禄劝  $M_s 6.3$ 、西藏妥坝  $M_s 5.6$  地震前均发生了 2 次水温异常; ②一次异常后对应 2 次地震。如 2003 年 6 月 22 日、2012 年 6 月 9 日等 4 次水温达到或超过阈值后在异常有效期内均发生了 2 次  $M_s \geq 5.5$  地震。自开展观测以来, 理塘毛垭温泉水温共有 18 次水温异常对应  $M_s \geq 5.5$  地震 19 次, 虚报 11 次, 对应率为 66%。对应发生的 19 次地震中, 多集中分布在川滇交界西侧 (图 6 中黑色虚线范围), 周边其他区域较为分散。除 2009 年姚安  $M_s 6.0$  地震外, 其余地震均发生在异常开始后 180 d 之内, 最短时间为 15 d, 表明该泉水温异常对青藏高原东南缘发生的地震具有

较好的中短期指示意义, 优势预测地点为川滇交界西侧地区。2021 年 5 月 21 日漾濞  $M_s 6.4$  地震满足 2020 年 12 月 20 日水温异常所指示的时、空、强三要素特征, 故认为此次异常对应漾濞  $M_s 6.4$  地震。

#### 4.2 漾濞 $M_s 6.4$ 地震前水温异常分析

##### 4.2.1 水温异常特征

2021 年 5 月 21 日 21 时 48 分 34 秒, 在云南省大理州漾濞县 (25.67°N, 99.87°E) 发生  $M_s 6.4$  地震, 震源深度 8 km, 震中位于维西—乔后断裂附近, 理塘毛垭 51 泉距地震震中约 480 km。2020 年 12 月 20—22 日该温泉水温连续上升, 幅度为 6.0 °C, 水温一阶差分值达到异常阈值, 其后又多次出现较为明显的小幅变化, 但均未达到异常阈值。逐一分析排查该泉观测环境及气象等各方面的干扰因素, 未发现任何干扰, 确认此次异常为地震前兆异常。异常开始 152 d 之后发生漾濞  $M_s 6.4$  地震, 理塘毛垭 51 泉水温在震前达到了异常阈值, 表现出中期异常特征 (图 7)。

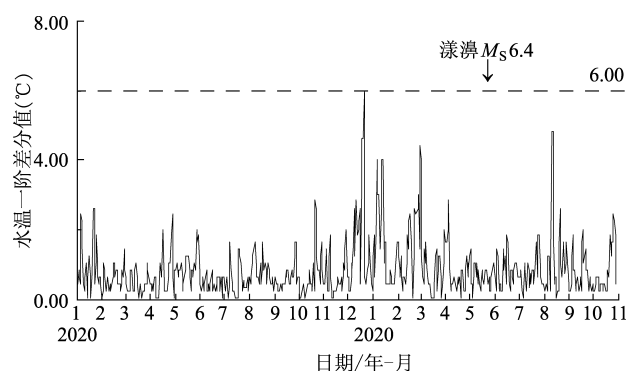


图 7 2020-01—2021-10 理塘毛垭 51 泉水温差分曲线

Fig. 7 The first-order difference graph of Maoya, Litang 51th spring from Jan., 2020 to Oct., 2021

##### 4.2.2 水温与气象关系

###### (1) 长期背景分析

本文收集 2010—2021 年理塘地区降雨、气温日值数据, 计算二者与水温日值变化之间的相关关系, 其中降雨与水温之间的相关计算结果表达式为:

$$y = 31.34 + 0.16(\pm 0.017)x \quad (2)$$

其相关系数  $R = 0.14$ , 说明降雨对水温变化的影响较小, 二者无显著相关关系, 这与前人的研究结

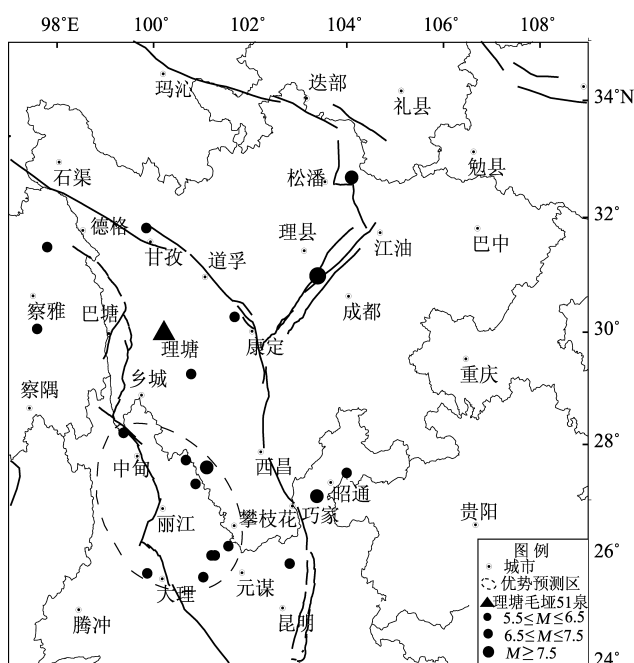


图 6 理塘毛垭 51 泉水温异常对应  $M_s \geq 5.5$  地震空间分布

Fig. 6 Location of Maoya, Litang 51th spring and spatial distribution of earthquakes associated with temperature anomalies

果(李军等, 2005; 龙德雄等, 2006)一致。气温与水温之间的相关计算结果表达式为:

$$y = 30.43 + 0.25(\pm 0.012)x \quad (3)$$

其相关系数  $R = 0.29$ , 较降雨与水温之间的线性相关显著, 但  $R$  值仍相对较小, 说明温泉水温受气温的干扰较小。

以上统计结果说明从长期变化趋势来看, 温泉水温测值基本上不受地表降雨的干扰, 但气温变化对水温测值存在一定的影响。

#### (2) 短期变化分析

为进一步研究气温与温泉水温之间的短期变化特征, 明确 2020 年 12 月水温异常是否为气温异常所致, 笔者对 2018 年 1 月至 2021 年 10 月的气温和温泉水温资料进行统计, 如图 8 所示。图中显示短时间内气温与水温整体趋势上具有同步性变化的特征。对 2018—2019 年水温正常变化期间的气温、水温变化幅度进行相关计算, 结果表明: 气温、水温变化幅度之间线性拟合相关系数  $R = -0.01$ , 说明气温上升幅度与水温上升幅度之间并非简单的线性相关, 二者只是变化趋势存在同步性, 无法根据气温变化的幅度计算水温的理论变化幅度。2020 年 12 月水温快速上升期间(图 8 中阴影部分), 气温仍然维持年变下降的趋势, 未出现气温异常上升情况。故认为此次水温异常升高并非气温干扰所致, 可能与观测泉区域构造应力发生变化有关。

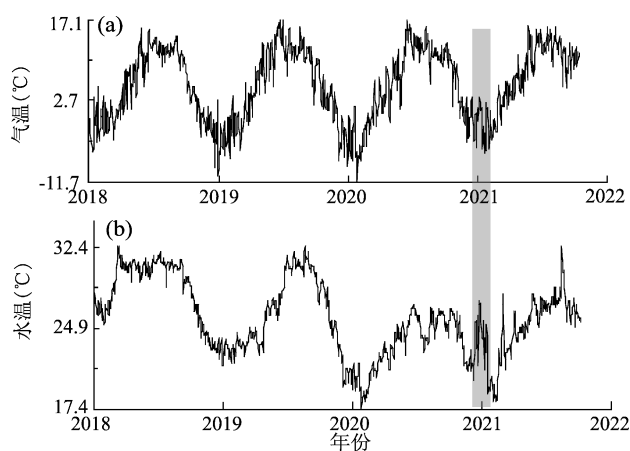


图 8 2018-01—2021-10 气温 (a)、  
水温 (b) 观测曲线日值

Fig. 8 Daily curves of air temperature (a) and water temperature (b) from Jan., 2018 to Oct., 2021

#### 4.2.3 水化学特征

地下水的化学组分和稳定同位素组成可以用于判定其水化类型、水-岩平衡反应特征及其组分来源(杨耀等, 2019; 孙如波, 林建国, 1998), 此外, 震前地下水离子浓度也会发生变化(Zhou *et al.*, 2021)。2021 年 1 月, 四川省地震局对理塘毛垭 51 泉及附近地表水体开展现场采样工作, 对水样离子组分浓度分析和同位素进行测试, 以上测试均在应急管理部国家自然灾害防治研究院完成。水化学分析结果(表 2, 图 9a)表明, 理塘毛垭 51 泉及河水 pH 值均大于 7, 呈弱碱性, 二者离子成分存在较大差异, 表明温泉水与地表水体无相关性, 不存在直接的水动力联系; 理塘毛垭 51 泉电导率和矿化度均较高, 为微咸水。从 Piper 三线图(图 9b)可以看出, 温泉的水化学类型为  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$  型, 主要阳离子为  $\text{Na}^+$ , 其次为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{K}^+$ , 主要阴离子为  $\text{HCO}_3^-$ , 其次为  $\text{Cl}^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ 。 $\text{Na} - \text{K} - \text{Mg}$  三角图(图 9c)显示, 温泉水靠近部分平衡水区域, 而河水落在 Mg 端元附近, 表明温泉水的水岩反应程度较高。氢氧同位素结果(图 9d)显示: 理塘毛垭 51 泉及河水均位于全球雨水线附近, 表明二者起源均为大气降水, 但理塘毛垭 51 泉表现出了轻微的“氧漂移”现象, 说明水体在循环过程中与含水层围岩发生离子交换, 存在一定程度的水岩作用。结合以上水化学及氢氧稳定同位素特征分析和前人对该泉的气体地球化学研究成果(Zhou *et al.*, 2017), 笔者认为理塘毛垭 51 泉具有深循环、幔源成因的流体来源特征, 水温异常变化能够反映地壳深部地热和构造活动信息。

#### 4.3 水温异常机理分析

理塘毛垭 51 泉水温上升异常与青藏高原东南缘中强地震具有较好的对应率, 这与该温泉观测点所处的构造位置密切相关。研究区处于青藏高原“东构造结”的东北缘, 地中海—喜马拉雅地热活动带的最东端(张健等, 2017)。新生代以来印度板块与欧亚板块间的持续碰撞与推挤导致了青藏高原的形成(Tapponnier *et al.*, 1986; Yin, Harrison, 2000; 许志琴等, 2016), 同时也控制着青藏高原内部和周边构造变形与地壳物质的运动(Royden *et al.*, 1997, 2008; Clark, Royden, 2000; Tapponnier *et al.*, 2001), 中下地壳在重力荷载以及高温高压的条件下具有流变的特征(嵇少丞等,

表 2 理塘毛垭 51 泉及附近水体水化学成分及同位素分析结果

Tab. 2 Chemical compositions and isotopes of the water samples of Maoya, Litang 51th spring and rivers

采样地点	Na <sup>+</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	K <sup>+</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	Mg <sup>2+</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	Ca <sup>2+</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	F <sup>-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	Cl <sup>-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / (mg·L <sup>-1</sup> )	TDS	电导率/ (μs·cm <sup>-1</sup> )	pH	δD (‰)	δ <sup>18</sup> O (‰)
毛垭温泉	729.23	45.21	20.84	49.93	4.55	29.18	36.90	3.80	2 251.53	1 547.00	3 070.00	8.05	-161.06	-19.4
河水	41.75	2.57	8.76	25.57	0.51	2.49	10.65	1.26	2 56.34	227.00	453.00	8.30	-133.30	-16.7

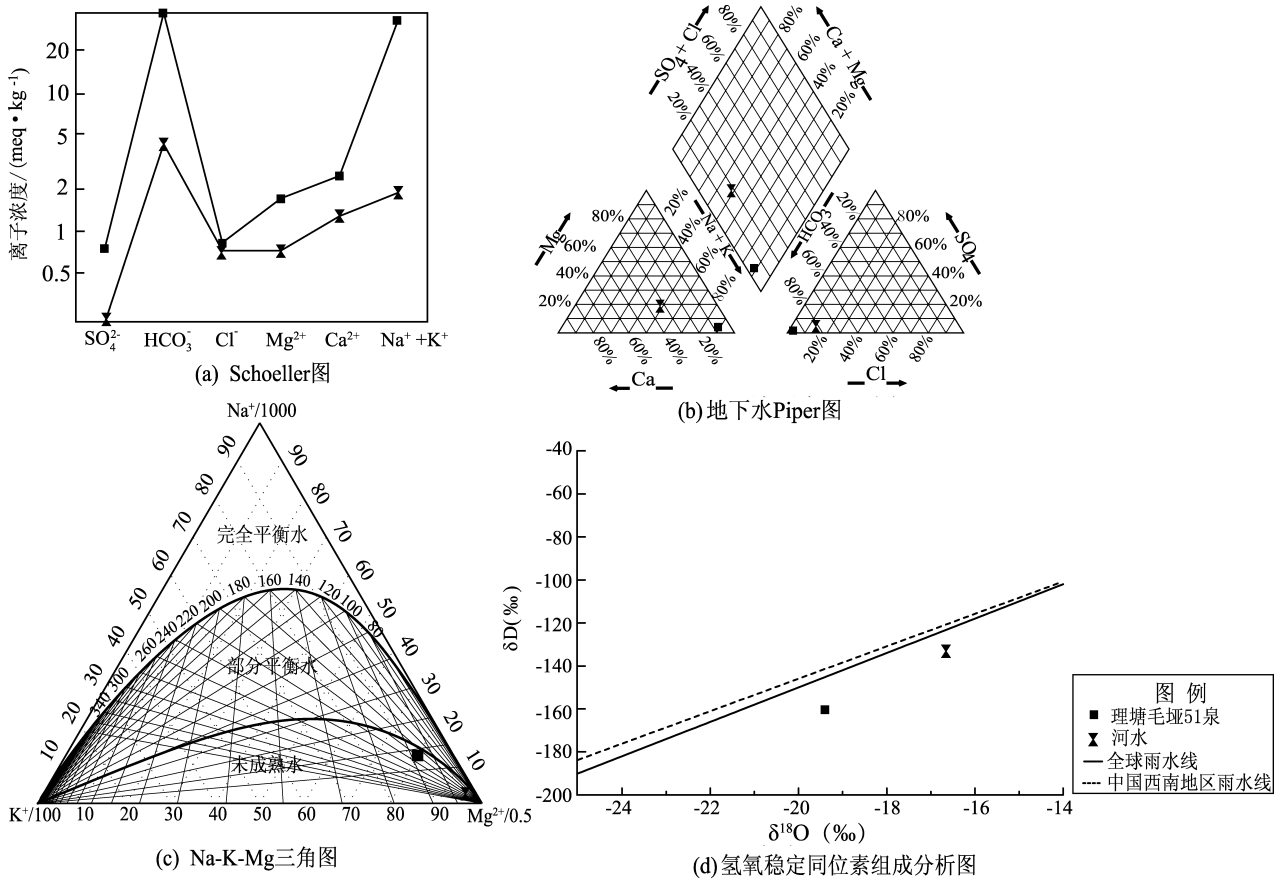


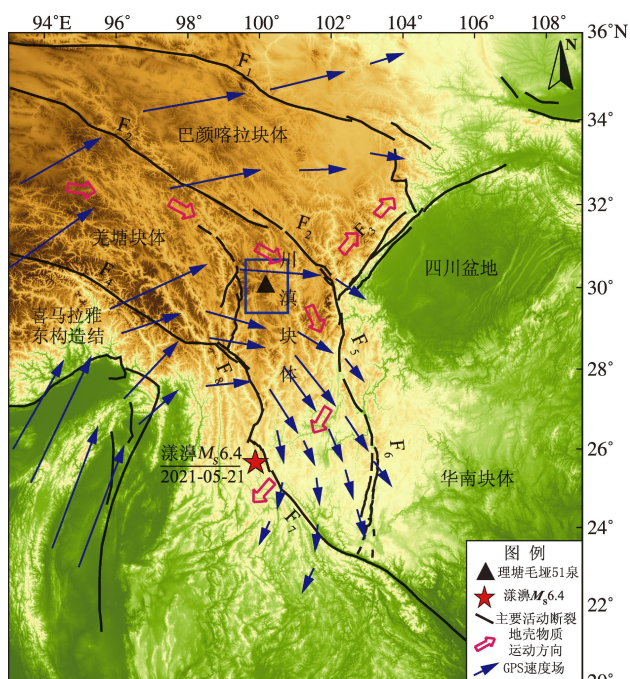
图 9 理塘毛垭 51 泉及河水水样测试结果分析图

Fig. 9 Chemical test of groundwater samples from Maoya, Litang 51th spring and rivers

2008), 中上地壳与下地壳或上地幔解耦, 导致青藏高原物质在差应力作用下向东南方向逃逸 (侧向挤出)。GPS、构造与古地磁研究均表明青藏高原地壳物质向东南方向逃逸过程中受到四川盆地和华南块体的阻挡, 围绕喜马拉雅东构造结做顺时针运动 (陈智梁等, 1998; 邓起东等, 2002; Zhang *et al*, 2004; Shen *et al*, 2005; Otfuji *et al*, 2010; Jin *et al*, 2019), 形成了一些大型走滑断裂, 同时制约着侧向挤出块体群 (许志琴等, 2016)。一方面, 地壳物质在逃逸过程在上地壳或近地表部分表现为刚性地块, 沿着走滑断裂带进行运动, 变形和应力主要集中在边界断裂上;

另一方面, 青藏高原中下地壳在高温高压的作用下存在低粘度的地壳流, 具有高温流动特征, 并富含流体 (Royden *et al*, 1997, 2008; 嵇少丞等, 2008; Zhao *et al*, 2008; 杜乐天, 2009)。地壳流从藏南拉萨块体经东构造结流向川滇菱形块体内部理塘—雅江, 然后又从理塘南北两个方向分流, 一个向南经川滇菱形块体流向保山—思茅块体, 另一个则向北经巴颜喀拉块体前缘 (龙门山断裂带) 流向祁连山 (Clark, Royden, 2000; 杨文采等, 2017)。地球物理研究表明, 中强地震多发生在高泊松比、低波速的异常体附近 (Lei *et al*, 2009, 2012; 刘文玉等, 2017;





$F_1$ : 东昆仑断裂;  $F_2$ : 玉树—鲜水河断裂;  $F_3$ : 龙门山断裂;  $F_4$ : 嘉黎断裂;  $F_5$ : 安宁河断裂;  $F_6$ : 小江断裂;  $F_8$ : 金沙江断裂

图 10 研究区 (蓝色矩形框) 和青藏高原东缘构造环境及 GPS 速度场示意图 (据 Zhang *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2005; 邓起东等, 2007; Hao *et al.*, 2019; 瞿伟等, 2021 修改)

Fig. 10 Schematic diagram of tectonic environment and GPS velocity field in the study area (blue rectangle) and the eastern edge of the Qinghai-Tibet Plateau (according to Zhang *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2005; Deng *et al.*, 2007; Hao *et al.*, 2019; Qu *et al.*, 2021)

王志等, 2017), 中下地壳乃至上地幔的深部流体对地震的孕育和发生起到重要的控制作用 (Zhou *et al.*, 2015, 2017)。

理塘毛垭 51 泉出露于川滇菱形块体内部的理塘断裂带上, 对该断裂带上温泉溢出气体的地球化学分析表明 (Zhou *et al.*, 2017), 理塘断裂带为来自地幔以及中下地壳的深层流体向上迁移的通道, 地幔流体来源的占比可达 11.1%, 这些深部流体对川滇地区中强地震的孕育发挥了重要的作用。张健等 (2017) 分析了川西高温水热活动去壳幔热流结构和深部地热特征, 结果表明理塘地区热流量较高, 具有较高的大地热流值。此外, 地震 S 波速度反演结果表明, 理塘地区下方 20 ~ 30 km 处存在 S 波低速区, 说明下方可能存在地壳

物质熔融区, 为温泉地热水提供热源。当青藏高原东南缘发生强震之前, 除在孕震区出现应力集中的现象, 中下地壳广泛存在的高温孕震流体也会发生物理和化学变化 (例如水温上升和水化组分改变等), 理塘毛垭 51 泉所在理塘断裂带又为这些孕震流体提供向地表迁移的通道。此外, 该温泉位于理塘盆地北缘, 该盆地为一大型断陷盆地, 受区域构造活动增强作用的影响, 高温热水受静水压力和水热对流作用增强。因此, 在青藏高原东南缘中强地震发生之前, 可监测到温泉水温上升的短临异常信息。

## 5 结论

本文通过对四川理塘毛垭 51 泉水温在青藏高原东南缘中强地震前出现的异常特征开展分析, 认为其水温上升超阈值异常对该区域中强地震具有较好的指示意义, 并针对温泉水温上升的异常机理进行了分析与讨论, 主要结论如下:

(1) 理塘毛垭 51 泉水温震前异常主要表现为快速上升的特征, 但汶川  $M_s 8.0$  地震后, 水温上升幅度有所下降, 由原 8 °C 降低为 6 °C。

(2) 理塘毛垭 51 泉水温异常与青藏高原东南缘中强地震具有较好的对应关系, 且地震几乎都发生在异常开始后的 180 d 内, 表明该泉水温异常对该区域内中强地震的发生具有良好的中短期指示意义。

(3) 水文地球化学及气体地球化学研究表明, 理塘毛垭 51 泉具有幔源成因流体特征, 在区域构造活动和地下深层流体共同作用下, 高温热水受静水压力和水热对流作用增强导致温泉观测水温上升是理塘毛垭 51 泉水温在中强地震之前出现异常的原因。

## 参考文献:

- 陈智梁, 沈凤, 刘宇平, 等. 1998. 青藏高原东部地壳运动的 GPS 测量[J]. 中国地质, (5): 32-35.
- 邓起东, 冉永康, 杨晓平, 等. 2007. 中国活动构造图 (1:400 万) [M]. 北京: 地震出版社.
- 邓起东, 张培震, 冉永康, 等. 2002. 中国活动构造基本特征[J]. 中国科学: 地球科学, 32(12): 1020-1030.
- 邓卫平, 何案华, 车用太, 等. 2019. 全国水温台网井水温度 2008 年动态及其汶川地震前后的异常变化[J]. 大地测量与地球动力学, 39(7): 751-755.
- 杜乐天. 2009. 幔汁 (HACONS 流体) 地球内动因探索[J]. 地球学

- 报,30(6):739-748.
- 付虹,刘自凤,胡小静,等. 2021. 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震异常跟踪分析[J]. 地震研究,44(3):301-308.
- 何案华,赵刚,刘成龙,等. 2012. 青海玉树与德令哈地热观测井在汶川与玉树地震前的异常特征[J]. 地球物理学报,55(4):1261-1268.
- 嵇少丞,王茜,孙圣思,等. 2008. 亚洲大陆逃逸构造与现今中国地震活动[J]. 地质学报,82(12):1644-1667.
- 贾晋康,李有才,胡先明,等. 1996. 理塘毛垭 51 泉近期特大异常的调查与分析[J]. 四川地震,(2):32-37.
- 瞿伟,高源,陈海禄,等. 2021. 利用 GPS 高精度监测数据开展青藏高原现今地壳运动与形变特征研究进展[J]. 地球科学与环境学报,43(1):182-204.
- 李加稳,孙文波. 2004. 邦腊掌温泉水水温地震异常特征研究[J]. 防灾技术高等专科学校学报,6(2):25-29.
- 李介成. 1983. 地下水动态与道孚 6.9 级地震的关系[J]. 地震研究,6(3):299-306.
- 李军,黄圣陆,闻学泽. 2005. 理塘毛垭 51 泉水温异常研究[J]. 四川地震,(3):10-16.
- 李军,马声浩,李介成. 1989. 川—51 温泉水温动态特征与地震[J]. 四川地震,(4):17-21.
- 刘亢,李岩峰,郭辉文,等. 2021. 1948 年川西理塘  $M7.3$  地震地表破裂特征及 Riedel 剪切构造分析[J]. 地质学报,95(8):2346-2360.
- 刘磊,张朋涛,苏维刚,等. 2021. 2021 年 5 月 22 日青海玛多  $M7.4$  地震前共和水温异常分析研究[J]. 地震工程学报,43(4):860-867.
- 刘文玉,李桐林,韩江涛,等. 2017. 怀—涿地区深部孕震环境研究与涿鹿地震发震机制的讨论[J]. 地球物理学报,60(7):2693-2706.
- 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.
- 刘耀炜. 2006. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾[J]. 中国地震,22(3):222-235.
- 龙德雄,黄辅琼,官致君. 2006. 四川理塘毛垭 51 泉地质构造环境及成因分析[J]. 四川地震,(1):34-40.
- 马丹,吴中海,李家存,等. 2014. 川西理塘断裂带的空间展布与第四纪左旋走滑活动的遥感影像标志[J]. 地质学报,88(8):1417-1435.
- 马玉川,晏锐,胡小静. 2021. 云南洱源井水温在 2021 年漾濞  $M_s6.4$  地震前的异常特征[J]. 地震学报,43(05):674-677.
- 强祖基,孔令昌,郭满红,等. 1997. 卫星红外增温机制的实验研究[J]. 地震学报,19(2):87-91.
- 邱桂兰,陈学芬,陈聪,等. 2019. 川西温泉水温的映震能力研究[J]. 国际地震动态,(8):135.
- 苏维刚,刘磊,袁伏全,等. 2021. 2021 年玛多  $M_s7.4$  地震前玉树地震台井水温异常特征[J]. 地震学报,43(3):392-396.
- 孙如波,杜建国. 1998. 五大连池火山区水文地球化学背景[J]. 矿物岩石地球化学通报,17(3):12-17.
- 王军,何案华,赵刚,等. 2018. 汶川地震前井水温度异常信息的识别及其特征[J]. 中国地震,34(3):465-472.
- 王林瑛,朱传镇. 1984. 唐山地震和海城地震前地温的异常变化[J]. 地震研究,7(6):649-656.
- 王庆良,王文萍,梁伟锋,等. 1998. 应力—耗散热地温前兆机理研究[J]. 地震学报,20(5):82-87.
- 王志,王绪本,黄润秋,等. 2017. 龙门山断裂带多参数深部结构成像与地震成因研究[J]. 地球物理学报,60(6):2068-2079.
- 徐锡伟,闻学泽,于贵华,等. 2005. 川西理塘断裂带平均滑动速率、地震破裂分段与复发特征[J]. 中国科学:地球科学,35(6):540-551.
- 许志琴,王勤,李忠海,等. 2016. 印度—亚洲碰撞:从挤压到走滑的构造转换[J]. 地质学报,90(1):1-23.
- 许志琴,杨经绥,姜枚,等. 1999. 大陆俯冲作用及青藏高原周缘造山带的崛起[J]. 地学前缘,6(3):139-151.
- 晏锐,官致君,刘耀炜. 2015. 川西温泉水温观测及其在芦山  $M_s7.0$  地震前的异常现象[J]. 地震学报,37(2):347-356.
- 杨文采,侯遵泽,徐义贤,等. 2017. 青藏高原下地壳热变形和管道流研究[J]. 地质论评,63(5):1141-1152.
- 杨晓霞,屠泓为. 2013. 德令哈井水温异常特征与地震的关系[J]. 高原地震,25(4):17-20.
- 杨晓霞,王小玲,李玉丽,等. 2016. 2016 年青海门源  $M_s6.4$  地震前地下流体异常特征分析[J]. 地震研究,39(S1):89-94.
- 杨耀,周晓成,官致君,等. 2019. 川西地下流体观测井水位地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报,38(5):966-976.
- 杨竹转,邓志辉,杨跃文,等. 2018. 2014 年鲁甸  $M_s6.5$  地震前云南丽江地下流体的异常变化[J]. 地震地质,40(2):480-498.
- 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[J]. 地震,17(4):389-396.
- 张彬,方震,刘耀炜,等. 2014. 云南地区水温异常与地震关系[J]. 地球科学(中国地质大学学报),39(12):1880-1886.
- 张健,李午阳,唐显春,等. 2017. 川西高温水热活动区的地热学分析[J]. 中国科学:地球科学,47(8):899-915.
- 张培震,邓超东,张国民,等. 2003. 中国大陆的强震活动与活动地块[J]. 中国科学:地球科学,33(S1):12-20.
- 张培震. 2008. 青藏高原东缘川西地区的现今构造变形、应变分配与深部动力过程[J]. 中国科学:地球科学,38(9):1041-1056.
- 赵庆生,李介成,马声浩. 1989. 川西地震长观温泉水温动态类型及其形成模式[J]. 成都科技大学学报,21(2):57-66.
- 郑裕民. 1984. 理塘幅 H-47-23 稻城幅 H-47-29 贡岭幅 H-47-35 1/20 万区域地质调查报告:地质部分,矿产部分[R]. 四川地矿局区调队.
- 周春景,吴中海,张克旗,等. 2015. 川西理塘活动断裂最新同震地表破裂形成时代与震级的重新厘定[J]. 地震地质,37(2):455-467.
- Clark M K, Royden L H. 2000. Topographic ooze: eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. Geology,28(8):703-706.
- Hao M, Li Y M, Zhuang W Q. 2019. Crustal movement and strain distribution in East Asia revealed by GPS observations[J]. Scientific Reports,9(1):16797.
- Jin H, Gao Y, Su X, et al. 2019. Contemporary crustal tectonic movement in the southern Sichuan—Yunnan block based on dense GPS observation data[J]. Earth and Planetary Physics,3(1):53-61.
- Lei J, Xie F, Mishra O P, et al. 2012. The 2011 Yingjiang, China, earthquake: a volcano-related fluid-driven earthquake? [J]. Bulletin

- of the Seismological Society of America, 102(1):417–425.
- Lei J, Zhao D. 2009. Structural heterogeneity of the Longmenshan fault zone and the mechanism of the 2008 Wenchuan earthquake ( $M_s 8.0$ ) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10(10):Q10010.
- Ma Y. 2016. Earthquake – related temperature changes in two neighboring hot springs at Xiangcheng, China [J]. *Geofluids*, 16(3):434–439.
- Otofuji Y, Yokoyama M, Kitada K, *et al.* 2010. Paleomagnetic versus GPS determined tectonic rotation around eastern Himalayan systaxis in East Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(5–6):438–451.
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Science*, 321(5892):1054–1058.
- Royden L H, Clark B, King R W, *et al.* 1997. Surface deformation and lower crustal flow in eastern Tibet [J]. *Science*, 276(5313):788–790.
- Shen Z K, Lu J N, Wang M, *et al.* 2005. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research – solid Earth*, 110(B11):B11409.
- Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 19(1):113–157.
- Tapponnier P, Xu Z, Roger F, *et al.* 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau [J]. *Science*, 294(5547):1671–1677.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan – Tibetan orogen [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1):211–280.
- Zhang P Z, Shen Z, Wang M, *et al.* 2004. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data [J]. *Geology*, 32:809–812.
- Zhao G Z, Chen X B, Wang L F, *et al.* 2008. Evidence of crustal ‘channel flow’ in the eastern margin of Tibetan Plateau from MT measurements [J]. *Chinese Science Bulletin*, (12):1887–1893.
- Zhou X C, Liu L, Chen Z, *et al.* 2017. Gas geochemistry of the hot spring in the Litang fault zone, Southeast Tibetan Plateau [J]. *Applied Geochemistry*, 79:17–26.
- Zhou X C, Wang W, Chen Z, *et al.* 2015. Hot spring gas geochemistry in Western Sichuan Province, China after the Wenchuan  $M_s 8.0$  earthquake [J]. *Terrastrial, Atmospheric, and Oceanic Sciences*, 26(4):361–373.
- Zhou Z H, Zhong J, Zhao J, *et al.* 2021. Two Mechanisms of Earthquake – Induced Hydrochemical Variations in an Observation Well [J]. *Water*, 13:2385.

## Anomaly Characteristics of the Water Temperature of Maoya, Litang 51th Spring before the Mid-strong Earthquakes in the Southeastern Tibetan Plateau and Its Precursor Mechanisms

RUI Xuelian<sup>1</sup>, YANG Yao<sup>1,2</sup>, GUAN Zhijun<sup>1</sup>, DU Fang<sup>1</sup>, XUE Qiaowen<sup>3</sup>,  
LONG Feng<sup>1</sup>, YANG Xing<sup>1</sup>, YANG Peng<sup>1</sup>

(1. *Sichuan Earthquake Agency, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

(2. *College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610041, Sichuan, China*)

(3. *Ganzi Prefecture Emergency Management Agency, Kangding 626099, Sichuan, China*)

### Abstract

Based on the temperature observation data of the water in Maoya, Litang spring over the 46 years, we analyze temperature dynamic variation characteristics of Maoya, Litang spring, and anomaly characteristics before the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake combined with regional hydrogeology, hydrogeochemistry, meteorology data. Further on, we discuss the probable anomaly mechanism of the spring water. The results show that there are differences in the amplitude of temperature anomaly at different background temperatures. Since 2009, the hot spring has changed from a medium – high temperature to a low-temperature one, and the abnormal threshold has been reduced from the original 8 °C to 6 °C. The Maoya spring is located at the junction of three active faults belonging to the Litang Fault Zone and it is characterized by deep circulation, thus spring’s temperature can reflect deep crustal or mantel fluid information and is sensitive to the regional tectonic activity related to earthquakes. The observed temperature of this spring shows abnormal characteristics before mid-strong earthquakes which occurred in the southeastern Tibetan Plateau, and the dominant earthquake-prone area is the southwestern part of the Sichuan – Yunnan Block.

**Keywords:** Maoya, Litang 51th hot spring; water temperature anomaly; the Yangbi  $M_s 6.4$  earthquake; the Litang Fault Zone