

晏锐, 官致君, 刘耀炜. 2015. 川西温泉水温观测及其在芦山 $M_S 7.0$ 地震前的异常现象. 地震学报, 37(2): 347—356.
doi:10.11939/jass.2015.02.014.

Yan R, Guan Z J, Liu Y W. 2015. Hot spring water observations and its anomalies before the Lushan $M_S 7.0$ earthquake in the western Sichuan region. *Acta Seismologica Sinica*, 37(2): 347—356. doi:10.11939/jass.2015.02.014.

川西温泉水温观测及其在芦山 $M_S 7.0$ 地震前的异常现象^{*}

晏 锐¹⁾ 官致君^{2),*} 刘耀炜³⁾

1) 中国北京 100045 中国地震台网中心

2) 中国成都 610041 四川省地震局

3) 中国北京 100085 中国地震局地壳应力研究所

摘要 在 2013 年芦山 $M_S 7.0$ 地震震中附近流体观测点进行现场考察的基础上, 本文选择川西地区观测环境较好、干扰较少的温泉水温观测资料进行回溯性分析。结果表明, 康定龙头沟和二道桥温泉、道孚龙普沟温泉、理塘毛垭温泉、泸定共和温泉水温在芦山地震前均出现不同程度的异常变化。其主要表现为, 距离震中较远的理塘毛垭温泉和道孚龙普沟温泉水温在震前 2 年左右出现中期尺度异常, 距离震中较近的康定龙头沟和二道桥温泉水温在震前 3 个月内出现短期异常。通过温泉水化学及 $\delta D-\delta^{18}O$ 稳定同位素特征分析, 认为这些温泉水具有深循环特征, 能灵敏地反映地壳深部地热及构造变化信息, 是芦山地震前观测到异常的可能原因。加强对这些温泉点的观测, 对区域地震预测研究具有重要的科学意义和现实意义。

关键词 芦山 $M_S 7.0$ 地震 温泉 水温 水化学

doi:10.11939/jass.2015.02.014 中图分类号: P314.1 文献标志码: A

Hot spring water observations and its anomalies before the Lushan $M_S 7.0$ earthquake in the western Sichuan region

Yan Rui¹⁾ Guan Zhijun^{2),*} Liu Yaowei³⁾

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Earthquake Administration of Sichuan Province, Chengdu 610041, China

3) Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract: On the basis of field survey of fluid observation sites near the epicenter of 2013 Lushan $M_S 7.0$ earthquake, hot spring temperature data observed at the sites with better observation environment and little human disturbance in the western Sichuan Province were selected to perform retrospective analysis. The results showed that different degrees of water temperature anomalies were observed at Longtougou and Erdaoqiao sites in Kangding region, Longpugou

* 基金项目 国家科技支撑计划项目(2012BAK19B02-03)资助。

收稿日期 2014-07-09 收到初稿, 2014-11-30 决定采用修改稿。

* 通讯作者 e-mail: guanwy11@163.com

site in Daofu county, Maoya site in Litang county, Gonghe site in Luding county before the Lushan $M_s 7.0$ earthquake. It was mainly showed that the mid-term anomalies about two years of time scale were observed at Maoya and Long-pugou hot spring sites far from the epicenter of Lushan earthquake; while the short-term anomalies within three months preceding the earthquake were observed at Longtougou and Erdaoqiao hot spring sites which were close to the earthquake epicenter. By the spring water hydrochemistry and δD - $\delta^{18}O$ stable isotopes analysis, it was suggested that these hot spring water have deep circulation characteristics, so the temperature changes of hot spring water can sensitively reflect deep crustal information in respect of geothermal and tectonic changes, which was the possible cause for the anomalies observed at the hot spring water preceding the Lushan earthquake. It was significant for the regional earthquake prediction research to strengthen observation of these hot spring sites.

Key words: Lushan $M_s 7.0$ earthquake; hot spring; water temperature; hydrochemistry

引言

据中国地震台网测定, 2013年4月20日08时02分, 四川省雅安市芦山县境内发生 $M_s 7.0$ 强烈地震(震中位置 30.3°N 、 103.0°E , 震源深度 13 km), 震中位于龙门山断裂带南段, 与 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震的发震断裂属同一断裂带。地震发生后, 最受关注的问题之一是震前是否观测到表征地震即将发生的异常信号。芦山地震与汶川地震之间尚存在 50 km 左右的破裂空段, 存在发生中强地震的潜在危险性(陈运泰等, 2013; 高原等, 2013; 单斌等, 2013; 易桂喜等, 2013), 在此段是否存在震前异常信号仍是亟待探讨的科学问题。地震地下流体学科组织专家, 于 2013 年 7 月中旬和 8 月初与芦山地震预测预报工作总结反思野外考察工作组一起对震区及相邻构造带的流体观测点位进行野外考察。重点考察了芦山地震震中距 300 km 范围内的鲜水河断裂带、安宁河—则木河断裂带和龙门山断裂带及其附近地区流体监测点的地质构造条件、观测环境及观测系统运行情况等。结果表明, 川西地区温泉具有较好的观测环境, 且温泉水温出现异常。

多年来, 温泉动态与地震活动关系得到广泛而深入的研究(Mogi *et al*, 1989; Silver, Valette-Silver, 1992; 王先彬等, 1992; Toutain *et al*, 1997; Poitrasson *et al*, 1999; 车用太等, 2006; Song *et al*, 2006), 内容主要涉及水物理、水化学、溢出气及同位素分析等与地震活动的关系。在川西地区, 李军等(2005)对理塘毛垭温泉 30 多年的水温观测资料进行统计分析, 认为该温泉水温异常与川滇地区强震活动之间存在较好的对应关系; 杨贤和和田玉萍(2001)、李志鹏和刘仕锦(2012)对康定龙头沟和二道桥温泉不同观测时段 CO_2 异常与地震活动之间的对应关系进行统计分析, 认为 CO_2 低值突跳异常与区域 $M_s 5.0$ 以上地震活动之间存在较好的对应关系; 赵庆生等(1989)对川西地区温泉水温动态特征进行分析, 将水温长期动态分为内力型、外力型和混合型 3 类, 认为内力型水温的一个重要特点是无显著的季节性变化, 水温变化与气象因素不相关, 而且内力型水温比外力型和混合型水温对地震的响应能力强。汶川 $M_s 8.0$ 地震后, 周晓成(2011)对川西地区的 32 个温泉点气体进行了 3 次重复采样, 同位素测量结果表明, 汶川 $M_s 8.0$ 地震发生时, 在川西鲜水河

断裂带、岷江断裂带和龙门山断裂带上, 温泉气体中的 $^{3}\text{He}/^{4}\text{He}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大幅度上升, 认为有大量幔源 He 和 CO_2 涌入地壳, 幔源流体上涌可能对汶川 $M_s 8.0$ 地震的孕育和发生起重要作用。

为探讨川西温泉水温在芦山 $M_s 7.0$ 地震前的变化特征及其地震预测意义, 笔者在现场考察的基础上, 对川西地区温泉水温长期观测资料进行深入分析, 对存在的异常特征进行系统总结, 并收集相关温泉的水文地球化学资料进行分析, 结合区域构造特征对芦山 $M_s 7.0$ 地震前川西地区出现的温泉水温异常变化机制进行讨论, 为加强该区域温泉流体监测和地震预测研究提供参考。

1 水温观测泉概况

研究区位于青藏高原东、四川盆地西缘。该区构造运动强烈, 活动断裂分布广泛, 河谷深切, 地震活动频繁, 有利于温泉的形成和出露。该区共计有温泉 248 处(罗来麟, 1994)。1973 年 2 月 6 日四川炉霍 $M_s 7.6$ 地震后, 四川省地震局逐步优选了一批典型的温泉点进行动态观测, 多年的温泉观测资料为地震预测研究积累了大量的宝贵资料。

常规观测的温泉点主要分布在鲜水河断裂带、安宁河—则木河断裂、龙门山断裂带、甘孜—理塘—稻城断裂及其周边地区(图 1)。经现场考察, 认为该区域观测环境较好, 不存在人为干扰。其中, 观测资料可靠性较高的温泉点主要有康定龙头沟和二道桥温泉、道孚龙普沟温泉、泸定共和温泉、理塘毛垭温泉等。水温观测每日在固定时段内固定点进行测量, 仪器为玻璃水银温度计, 分辨率为 0.1°C 。表 1 列出了芦山 $M_s 7.0$ 地震震中附近温泉异常点的观测背景与异常信息。

道孚龙普沟温泉位于鲜水河断裂带中段的 NE 侧, 距鲜水河主干断裂约 3.7 km, 在道孚县城以东约 10 km 的龙

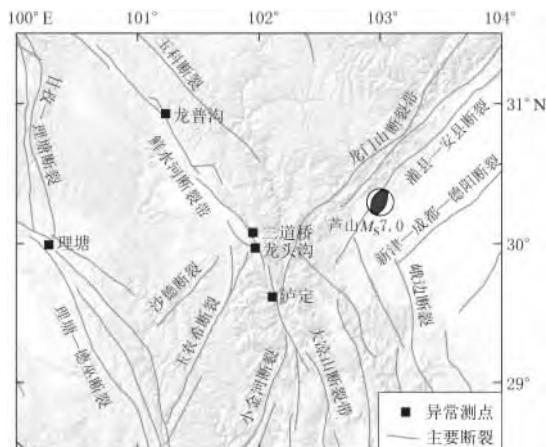


图 1 温泉观测异常点与芦山 $M_s 7.0$

地震震中分布图

Fig. 1 Distribution of hot spring observation sites and the Lushan $M_s 7.0$ earthquake epicenter

表 1 芦山 $M_s 7.0$ 地震震中附近温泉异常点观测背景与异常信息

Table 1 Observation background and anomalous information of the hot spring sites near Lushan $M_s 7.0$ earthquake epicenter

序号	温泉点	测项	水质类型	海拔 /m	背景幅度 / $^\circ\text{C}$	震中距 /km	异常出现时间 年-月-日	异常幅度 / $^\circ\text{C}$	地幔氦贡献率*
1	康定二道桥	水温	$\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$	2664	40.3 ± 0.6	104	2013-01-31	1	34.1%
2	康定龙头沟	水温	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	2950	72.0 ± 0.6	106	2013-02-18	1	10.3%
3	道孚龙普沟	水温	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	3713	38.1 ± 1.0	184	2011-03-31	2	2.3%
4	理塘毛垭	水温	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	3960	43.2 ± 7.5	266	2011-03-01	19	
5	泸定共和	水温	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	1652	60.0 ± 1.3	115	2011-05-07	-3	16.1%

* 引自周晓成, 2011

普沟上游约 5 km 处。该温泉以泉群方式多处出露，泉眼出露在第四系堆积层上，泉点附近岩性为三叠系砂板岩，并有花岗岩出露，其水质为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型，海拔为 3713 m。自 1978 年开始观测至今，正常情况下其水温年动态清晰，水温变化范围为 36°C—41°C。

康定温泉群位于鲜水河断裂带东南段，温泉主要分布于雅拉河下游二道桥—榆林宫约 15 km 的范围内。该区出露有 10 多个温泉群，100 多个泉口，温度在 28°C—90°C 之间，大部分泉口附近有石灰华堆积。其中，龙头沟温泉位于康定城南约 12 km 处的鲜水河断裂带北东侧，海拔为 2950 m，泉点附近出露岩性为二叠系千枚岩和燕山期花岗岩，泉点出口处有泉华沉淀。其水质为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型，流量为 0.4 L/s 左右，气体组分以 CO_2 、 N_2 、 O_2 和 Ar 为主 (Liu *et al*, 2000)。该泉自 1997 年开始观测水温，水温变化范围为 65°C—75°C。二道桥温泉位于康定城北约 4 km 处，海拔为 2664 m。该泉点以泉群方式出露于与鲜水河断裂带平行的雅拉河断裂上盘，共 15 个泉眼，其岩性为古生界灰岩与中生界砂岩夹板岩和千枚岩，泉点附近有泉华沉淀。其水质为 $\text{HCO}_3\text{-Ca-Na}$ 型，流量为 40 L/s 左右，气体组分以 CO_2 、 N_2 、 O_2 和 Ar 为主 (曹云等, 2006)。该泉自 1980 年开始水温观测，水温变化范围为 39°C—42°C。曾经对二道桥和龙头沟温泉的 SiO_2 、 F^- 、 $\text{O}_2 + \text{Ar}$ 、 N_2 、pH 值等进行观测，目前还对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 和电导率进行日常观测。

泸定共和温泉位于鲜水河断裂带最南段，地处川西峡谷地带，介于二郎山与雪峰山之间。该温泉位于泸定城西南约 30 km 处摩西河西岸的第四系沉积物中，泉点附近出露地层岩性为二叠系变质灰岩和千枚岩，其水质为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。该泉点海拔为 1652 m，自 1999 年开始观测至今，水温变幅在 47°C—66°C 之间。

理塘毛垭温泉出露于川滇地块中偏北的 NW 向理塘断裂与近 NS 向的甘孜—理塘—稻城断裂交汇部位。该区有温泉和气泉共 30 余处。毛垭温泉为该温泉密集带之一，位于理塘盆地北缘，为上升泉，泉华较厚，泉华以下地层为 T_{1-2} 灰岩砂岩互层，覆盖在印支期花岗岩之上，其水质为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型。泉水具有深循环特征，水温与气象因素不相关 (李军等, 2005；龙德雄等, 2006)。该泉点海拔为 3960 m，自 1975 年开始观测至今，水温变化范围为 26°C—66°C。

2 水温异常分析

2.1 异常分析方法

温泉水温多年动态资料显示：康定二道桥、龙头沟温泉和泸定共和温泉水温无显著的季节性变化；道孚龙普沟温泉水温具有显著的年动态变化特征；理塘毛垭温泉水温年动态特征不显著，且在时间上呈现出阶段性特征 (赵庆生等, 1989)。因此，为消除年变特征，突出趋势异常，本文利用小波分解方法对道孚龙普沟和理塘毛垭温泉水温进行滤波处理 (图 2c, d 中的灰色曲线)，其它温泉水温直接采用原始观测资料。

为分析温泉水温异常变化与地震之间的对应关系，首先挑选出距离台站 300 km 范围内的 $M_s 5.0$ 以上地震，然后根据地震前兆可能反映的最大震中距与震级之间的关系进行标注 (Dobrovolsky *et al*, 1979)，即 $D \leqslant 10^{0.433M - 0.06}$ 。其中， M 表示地震震级， D 表示震中距。图 2 给出了每一次地震的震中距。

2.2 异常变化特征

图 2 为自 2004 年以来温泉水温观测日值曲线。可以看出，位于康定地区的二道桥和龙

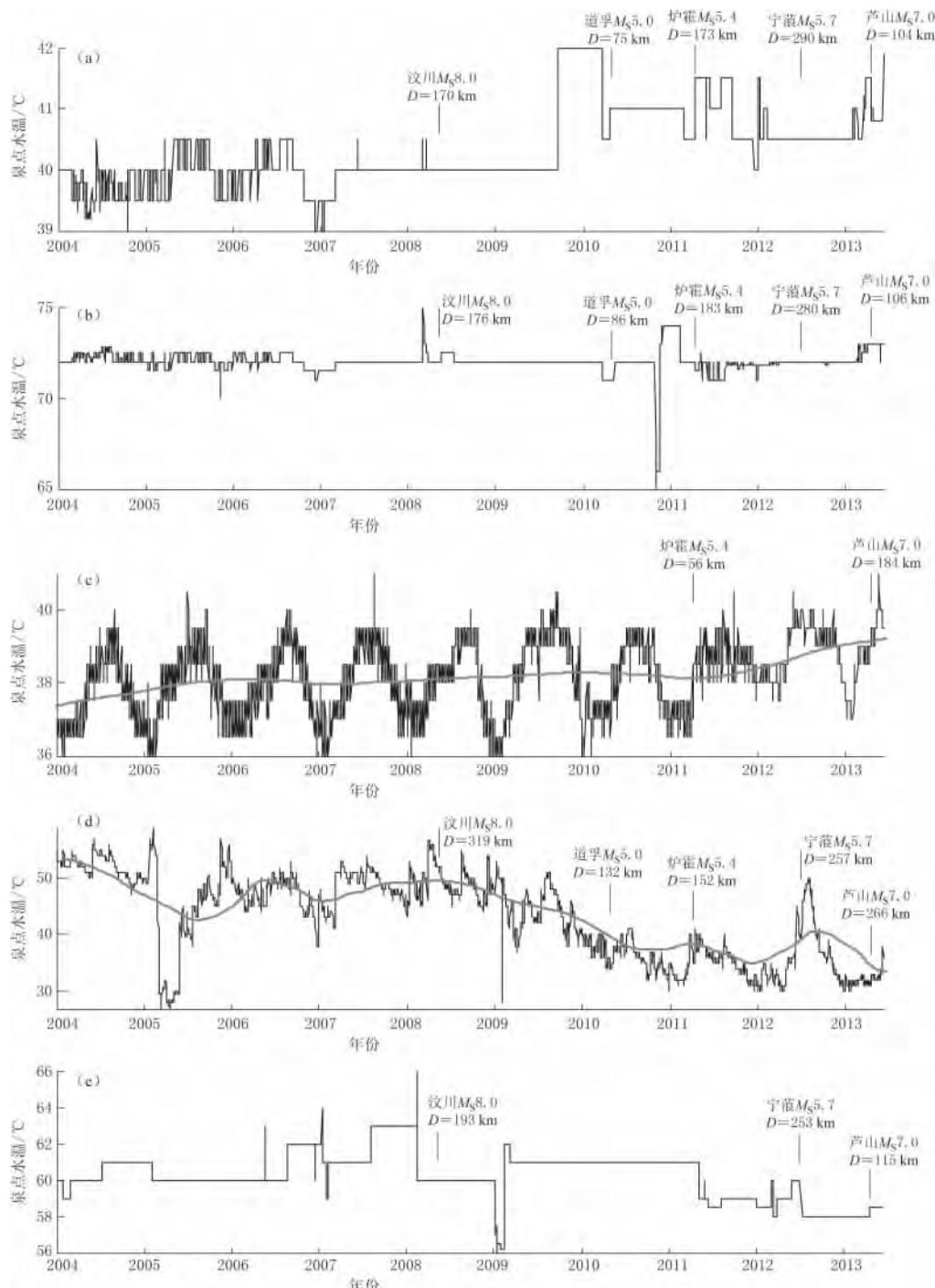


图 2 温泉水温观测日值曲线

(a) 康定二道桥温泉; (b) 康定龙头沟温泉; (c) 道孚龙普沟温泉; (d) 理塘毛垭温泉; (e) 泸定共和温泉

Fig. 2 Observation curves of hot spring water temperature

(a) Erdaoqiao hot spring in Kangding region; (b) Longtougou hot spring in Kangding region; (c) Longpugou hot spring in Daofu county; (d) Maoya hot spring in Litang county; (e) Gonghe hot spring in Luding county

头沟温泉水温几次起伏变化存在准同步性，主要表现为 2008 年 5 月 12 日汶川 $M_s 8.0$ 地震、2010 年 4 月 28 日道孚 $M_s 5.0$ 地震、2011 年 4 月 10 日炉霍 $M_s 5.4$ 地震、2012 年 6 月 24 日宁蒗 $M_s 5.7$ 地震和 2013 年芦山 $M_s 7.0$ 地震前的起伏变化。康定二道桥温泉水温自 1980 年开始正式观测，2004 年以来的观测资料显示，其水温正常动态为 $40.3^\circ\text{C} \pm 0.6^\circ\text{C}$ ；2009 年 9 月 17 日水温由 40°C 上升到 42°C ，之后维持在相对较高的水平起伏变化，起伏变化期间尽管发生道孚 $M_s 5.0$ 、炉霍 $M_s 5.4$ 和宁蒗 $M_s 5.7$ 地震，但水温在几次地震后均未恢复到 40°C 的正常动态；2013 年 1 月 31 日开始水温再次出现起伏上升，直至芦山 $M_s 7.0$ 地震发生。康定龙头沟温泉水温于 2013 年 2 月 18 日也出现了起伏上升，上升幅度达 1°C （表 1）。

道孚龙普沟、理塘毛垭和泸定共和温泉水温于 2011 年上半年出现准同步变化异常（图 2）。道孚龙普沟温泉水温正常动态呈现出夏季高冬季低的年动态特征，2011 年 3 月 31 日水温开始出现年动态上升，到冬季水温并没有下降到之前的正常年动态，相对往年冬季上升了 2°C 左右，呈现出水温升高年变幅度变小的异常特征。理塘毛垭温泉水温于 2008 年汶川 $M_s 8.0$ 地震后出现趋势性转折下降，水温由 2008 年的 50°C 左右下降至 2011 年 3 月 1 日的 31°C 左右，之后维持在低值起伏变化，起伏过程中曾发生 2011 年炉霍 $M_s 5.4$ 和 2012 年宁蒗 $M_s 5.7$ 地震。泸定共和温泉水温于 2011 年 5 月 7 日由 61°C 正常动态下降至 59°C ，之后在低值起伏变化，直至芦山地震发生引起 0.5°C 的同震上升变化。

3 异常泉点水化学特征

异常泉点水化学类型均为 HCO_3-Na 型（表 1）。该型的温泉水主要由于 CO_2 气体在地壳深部缺氧条件下溶解产生的弱酸性水溶液在沿裂隙上升过程中与富含 Na^+ 的长石矿物发生水岩反应而形成（Giggenbach, 1988）。其中，康定龙头沟温泉 Cl^- 浓度较高，为 206 mg/L ，康定二道桥温泉 Cl^- 浓度为 46 mg/L 。一般认为富含 Cl^- 的温泉水主要来源于地壳深部，说明这些温泉水具有深循环特征。

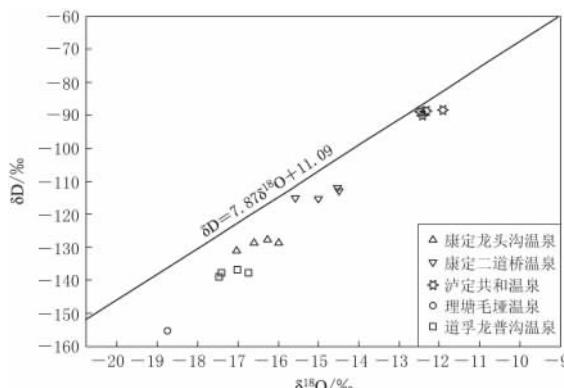


图 3 温泉水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 同位素(部分资料来源于李军等(1989)和 Chen 等(2014))与西南地区大气降水线对比图(引自王恒纯, 1991)

Fig. 3 Comparison of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ isotopes of hot spring water (partial data were from Li *et al* (1989) and Chen *et al* (2014)) and meteoric water line in the southwestern China (after Wang, 1991).

$\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 同位素是研究泉水来源的重要手段之一。该同位素测量结果表明（李军等, 1989; Chen *et al*, 2014），这些泉点的 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 同位素主要分布在西南地区大气降水线（王恒纯, 1991）富含 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素的一侧（图 3），说明泉水主要来源于大气降水与不同来源水的混合（Giggenbach, 1992）。

4 水温异常特征及其形成条件

活动断裂带是地球深部物质向地表迁移的主要通道，研究活动断裂带附近温泉流体的地球化学特征，是揭示温泉流体来源及形成机制的有效途径之一。水化学资料分析显示，

这些温泉水主要为大气降水渗入到地壳深部, 经加热、混合后沿活动断裂带向地表迁移而形成。该结论得到其它相关研究成果的支持。例如: 杨立铮等(1999)根据二氧化硅温标方程计算康定温泉区深部热储温度约为 150°C — 200°C , 水化学分析和碳同位素测定结果显示康定温泉属于富含深源 CO_2 的温泉系统, 表明温泉水可能有少量来源于深部的流体混入; Liu 等(2000)分析了康定温泉群地热 CO_2 -水-碳酸盐岩系统的水文地球化学、碳稳定同位素特征及 CO_2 来源, 认为该系统 CO_2 来源于幔源 CO_2 与碳酸盐岩地层变质 CO_2 的混合; 张加桂和胡海涛(2000)利用同位素质量守恒准则, 估计康定二道桥、龙头沟和道孚龙普沟温泉水溶解 CO_2 中幔源 CO_2 含量分别为 88.8%、83.0% 和 87.0%; 王先彬等(1992)对巴塘地震区温泉气体的化学组成和 He 、 Ar 、 CH_4 ($\delta^{13}\text{C}$) 同位素组成的研究结果表明, He 、 H_2 和非大气成因的 N_2 浓度及 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 值能反映地壳深部构造运动信息, 与地震活动关系密切; 周晓成(2011)根据不同来源气体 ${}^3\text{He}/{}^4\text{He}$ 、 $\text{CO}_2/{}^3\text{He}$ 、 $\text{He}-\text{N}_2-\text{Ar}$ 比值等不同, 认为 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震后, 位于鲜水河断裂带的康定龙头沟和二道桥、道孚龙普沟、泸定共和等温泉水具有幔源流体来源特征, 且康定地区幔源 He 同位素的贡献率最高达 34.1% (表 1)。综上所述, 出现水温异常的这些温泉观测点均具有壳源甚至幔源成因的流体来源, 温泉水温变化能反映地壳深部构造活动信息, 为地震监测预报研究提供了有利的天然条件。

从温泉点水温异常的空间分布来看, 异常泉点主要分布在芦山 $M_S 7.0$ 地震震中以西 300 km 范围内的主要活动断裂带上, 而且距离震中较远的道孚龙普沟和理塘毛垭温泉水温主要表现为 2 年左右的中期尺度异常特征, 距离震中较近的康定龙头沟和二道桥温泉水温在趋势异常背景下还观测到 3 个月左右时间尺度的中短期异常。

从温泉点水温异常出现的时间来看, 异常出现时间主要集中分布于两个时段, 表现出一定的阶段性特征。其中泸定共和温泉、道孚龙普沟温泉和理塘毛垭温泉水温异常出现时间具有一定的准同步性, 主要出现在 2011 年上半年(震前 2 年左右), 表现出一定的中期前兆特征。该异常出现时间范围与其它学科多项观测异常出现时间具有一定的相关性。例如: 祝意青等(2013)利用川西地区 2010 年 9 月—2012 年 10 月的流动重力观测资料, 系统分析了区域重力场变化及其与芦山地震的关系, 结果表明重力场差分动态演化图像和重力场累积变化动态图像均反映了芦山地震孕育过程的最后 2—3 年出现较显著的流动重力异常变化; 荣代潞和李亚荣(2013)研究了芦山地震前 5 年震中周围地区中等地震活动的空间相关长度变化, 结果表明从地震前两年开始, 中等以上地震的空间相关长度出现明显增长, 变化趋势可以用幂次率进行很好的拟合; 易桂喜等(2013)研究了芦山地震震中附近地区中小地震的视应力水平, 认为该地区视应力水平相对较高, 并于 2011 年开始快速增强。而康定二道桥和龙头沟温泉水温异常主要出现在震前 3 个月, 表现出一定的中短期异常特征, 尤其康定二道桥温泉水温异常出现时间与陈顺云等(2013)在康定布设的无线地温遥测台网观测到的异常日期完全相同, 均出现在 2013 年 1 月 31 日, 这两个测点的距离仅相差 2.4 km, 且该温泉水温异常的幅度(1°C)远大于陈顺云等(2013)观测到的地温异常幅度(0.001°C — 0.003°C), 进一步说明了该温泉水温异常的灵敏性和可靠性。

从温泉点水温异常的变化形态和幅度来看, 除泸定共和温泉水温在震前表现为相对下降外, 其它温泉水温均表现为相对上升, 且各测点的异常变化幅度有所不同, 这可能与温泉点所处构造部位的水动力特征有关。由于岩石的热传导系数较低, 地壳深部水温变化需

要很长时间才能传到地表,因此热传导机制不能解释水温的大幅度变化。然而地下流体的热对流能更有效地将深部温度的变化传送到地表,尤其是在活动断裂带地区,由于构造活动的增强,可能增强或减弱活动断裂带或破碎带的水动力特征,从而导致水温的上升或下降(Gottardi *et al.*, 2013)。对于本文中的温泉,由于各泉点所处的构造部位与水力联系的不同,所以各泉点异常变化形态和幅度存在一定差别,尤其是位于鲜水河断裂带最南段的泸定共和温泉,由于松潘—甘孜地块整体向东移动过程中受到东侧的华南地块阻挡,致使鲜水河断裂带最南段深部的水力联系减弱,可能是导致该泉点水温下降的主要原因。

5 结论

芦山 $M_s 7.0$ 地震前,川西地区的 5 个温泉点水温出现了不同程度的异常变化。从这些温泉点水温异常出现的时间过程来看,主要表现为 2 年左右时间尺度的中期异常和 3 个月时间尺度的短期异常;从异常时空演化过程来看,距离震中较近的康定二道桥和龙头沟温泉水温在震前 3 个月左右出现了短期异常,距离震中较远的理塘毛垭温泉和道孚龙普沟温泉主要表现为 2 年左右时间尺度的中期异常特征。

$\delta D-\delta^{18}O$ 同位素分析结果显示,温泉水主要来源于大气降水与深部热水的混合,表明这些流体具有深循环特征,能灵敏地反映出地壳深部的构造信息。但由于温泉水的流经途径存在较大差异,不同构造动力可能会产生不同形态、不同幅度的异常变化,致使不同震级、不同构造部位发生的地震前兆存在复杂性。温泉水温与地震之间的关系,温泉水温对不同构造动力的响应,以及外部非构造因素对温泉水温的影响都是十分重要的科学问题,尚有待进一步研究。

在中国地震局监测预报司及预报管理处组织的“四川芦山 $M_s 7.0$ 地震预测预报工作总结反思”专项工作过程中,专项工作组组长刘桂萍研究员的精心指导,闻学泽研究员对观测点水文地质背景进行现场的讲解,以及与工作组其他成员的讨论是本文研究的基础;本研究得到中国地震局监测预报司及地震预报管理处和四川省地震局的大力支持,评审专家对本文提出了修改建议,在此一并表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 曹云,李红春,刘再华,袁道先,沈立成. 2006. 重庆市北温泉与四川康定温泉水之地球化学特征对比[J]. 中国岩溶, 25(2): 112–120.
- Cao Y, Li H C, Liu Z H, Yuan D X, Shen L C. 2006. Comparsion of geochemical features of warm springs between Chongqing and Kangding[J]. *Carsologica Sinica*, 25(2): 112–120 (in Chinese).
- 车用太,鱼金子等编著. 2006. 地震地下流体学[M]. 北京: 气象出版社: 185–195.
- Che Y T, Yu J Z, *et al* ed. 2006. *Underground Fluids and Earthquake*[M]. Beijing: Meteorological Press: 185–195 (in Chinese).
- 陈顺云,刘培洵,刘力强,马瑾. 2013. 芦山地震前康定地温变化现象[J]. 地震地质, 35(3): 634–640.
- Chen S Y, Liu P X, Liu L Q, Ma J. 2013. A phenomenon of ground temperature change prior to Lushan earthquake observed in Kangding[J]. *Seismology and Geology*, 35(3): 634–640 (in Chinese).
- 陈运泰,杨智娴,张勇,刘超. 2013. 从汶川地震到芦山地震[J]. 中国科学: 地球科学, 43(6): 1064–1072.
- Chen Y T, Yang Z X, Zhang Y, Liu C. 2013. From 2008 Wenchuan earthquake to 2013 Lushan earthquake[J]. *Scientia Sinica Terra*, 43(6): 1064–1072 (in Chinese).

- 高原, 王琼, 赵博, 石玉涛. 2013. 龙门山断裂带中南段的一个破裂空段: 芦山地震的震后效应[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1038–1046.
- Gao Y, Wang Q, Zhao B, Shi Y T. 2013. A rupture blank zone in middle south part of Longmenshan faults: Effect after Lushan $M_S 7.0$ earthquake of 20 April 2013 in Sichuan, China[J]. *Science China: Earth Sciences*, **57**(9): 2036–2044.
- 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.
- Li J, Ma S H, Li J C. 1989. Water temperature dynamic characteristics and earthquakes at the Maoya hot spring in Sichuan Province[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (4): 17–21 (in Chinese).
- 李军, 黄圣睦, 闻学泽. 2005. 理塘毛垭温泉水温异常研究[J]. 四川地震, (3): 10–16.
- Li J, Huang S M, Wen X Z. 2005. Discussing the temperature abnormal changes of spring water in Maoya[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (3): 10–16 (in Chinese).
- 李志鹏, 刘仕锦. 2012. 四川康定龙头沟温泉 CO_2 突降异常与地震活动关系[J]. 地震地磁观测与研究, **33**(2): 80–83.
- Li Z P, Liu S J. 2012. Relativity between anomalies of escaped gas (CO_2) and seismic activity at Longtougou, Kangding, Sichuan Province[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, **33**(2): 80–83 (in Chinese).
- 龙德雄, 黄辅琼, 官致君. 2006. 四川理塘毛垭温泉地质构造环境及成因分析[J]. 四川地震, (1): 34–40.
- Long D X, Huang F Q, Guan Z J. 2006. Analysis on the geotectonic environment and the forming factors of the hot spring in Maoya[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (1): 34–40 (in Chinese).
- 罗来麟. 1994. 四川西部温泉分布及成因初探[J]. 重庆师范学院学报: 自然科学版, **11**(2): 39–47, 52.
- Luo L L. 1994. Inquisition of the distribution and causes of hot springs in western Sichuan[J]. *Journal of Chongqing Teachers College: Natural Science Edition*, **11**(2): 39–47, 52 (in Chinese).
- 荣代潞, 李亚荣. 2013. 芦山 7.0 级地震前地震活动的临界点特征[J]. 地震工程学报, **35**(2): 252–256.
- Rong D L, Li Y R. 2013. The critical point behavior of seismic activities prior to Lushan $M_S 7.0$ earthquake in 2013[J]. *China Earthquake Engineering Journal*, **35**(2): 252–256 (in Chinese).
- 单斌, 熊熊, 郑勇, 金笔凯, 刘成利, 谢祖军, 许厚泽. 2013. 2013 年芦山地震导致的周边断层应力变化及其与 2008 年汶川地震的关系[J]. 中国科学: 地球科学, **43**(6): 1002–1009.
- Shan B, Xiong X, Zheng Y, Jin B K, Liu C L, Xie Z J, Hsu H T. 2013. Stress changes on major faults caused by 2013 Lushan earthquake and its relationship with 2008 Wenchuan earthquake[J]. *Science China: Earth Sciences*, **56**(7): 1169–1176.
- 王恒纯. 1991. 同位素水文地质概论[M]. 北京: 地质出版社: 62.
- Wang H C. 1991. *Introduction to Isotopes Hydrology*[M]. Beijing: Geological Publishing House: 62 (in Chinese).
- 王先彬, 陈践发, 徐胜, 杨辉, 薛啸峰, 王文懿. 1992. 地震区温泉气体的地球化学特征[J]. 中国科学: B 辑, **22**(8): 849–854.
- Wang X B, Chen J F, Xu S, Yang H, Xue X F, Wang W Y. 1992. Geochemistry characteristics of hot spring gases in earthquake zone[J]. *Science in China: Series B*, **22**(8): 849–854 (in Chinese).
- 杨立铮, 卫迦, 孙晋玉. 1999. 四川康定温泉系统深源 CO_2 释放研究[J]. 地质学报, **73**(3): 278–285.
- Yang L Z, Wei J, Sun J Y. 1999. A study of the deep-source CO_2 release of the hot springs system in Kangding, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, **73**(3): 278–285 (in Chinese).
- 杨贤和, 田玉苹. 2001. 康定温泉逸出气百分含量突跳与地震对应关系[J]. 四川地震, (1): 42–44.
- Yang X H, Tian Y P. 2001. Relative relationship between earthquakes and sudden changes of air content of the hot spring in Kangding[J]. *Earthquake Research in Sichuan*, (1): 42–44 (in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 乔慧珍, 王思维, 宫悦. 2013. 龙门山断裂带南段应力状态与强震危险性研究[J]. 地球物理学报, **56**(4): 1112–1120.
- Yi G X, Wen X Z, Xin H, Qiao H Z, Wang S W, Gong Y. 2013. Stress state and major-earthquake risk on the southern segment of the Longmenshan fault zone[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(4): 1112–1120 (in Chinese).
- 张加桂, 胡海涛. 2000. 四川省鲜水河断裂带温泉的 CO_2 释放量的定量化研究[J]. 水文地质工程地质, **27**(3): 19–21.
- Zhang J G, Hu H T. 2000. Quantification research of CO_2 outgassing from hot springs along Xianshuihe fault zone,

- Sichuan[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, **27**(3): 19–21 (in Chinese).
- 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, (2): 57–66.
- Zhao Q S, Li J C, Ma S H. 1989. The fluctuation types of hot spring temperature and its forming model in seismic area in Sichuan Province[J]. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, (2): 57–66 (in Chinese).
- 周晓成. 2011. 汶川 $M_{\text{S}}8.0$ 地震后川西地区的气体地球化学[D]. 合肥: 中国科学技术大学地球和空间科学学院: 20–49.
- Zhou X C. 2011. *Gas Geochemistry in Western Sichuan Related to 12 May 2008 Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ Earthquake*[D]. Hefei: School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China: 20–49 (in Chinese).
- 祝意青, 闻学泽, 孙和平, 郭树松, 赵云峰. 2013. 2013 年四川芦山 $M_{\text{S}}7.0$ 地震前的重力变化[J]. 地球物理学报, **56**(6): 1887–1894.
- Zhu Y Q, Wen X Z, Sun H P, Guo S S, Zhao Y F. 2013. Gravity changes before the Lushan, Sichuan, $M_{\text{S}}=7.0$ earthquake of 2013[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **56**(6): 1887–1894 (in Chinese).
- Chen Z, Du J G, Zhou X C, Yi L, Liu L, Xie C, Cui Y J, Li Y. 2014. Hydrochemistry of the hot springs in western Sichuan Province related to the Wenchuan $M_{\text{S}}8.0$ earthquake[J]. *Sci World J*. doi:10.1155/2014/901432.
- Dobrovolsky I P, Zubkov S I, Miachkin V I. 1979. Estimation of the size of earthquake preparation zones[J]. *Pure Appl Geophys*, **117**(5): 1025–1044.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, **52**(12): 2749–2765.
- Giggenbach W F. 1992. Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **113**(4): 495–510.
- Gottardi R, Kao P H, Saar M O, Teyssier C. 2013. Effects of permeability fields on fluid, heat, and oxygen isotope transport in extensional detachment systems[J]. *Geochem Geophys Geosy*, **14**(5): 1493–1522.
- Liu Z H, Yuan D X, He S Y, Zhang M L, Zhang J G. 2000. Geochemical features of the geothermal CO_2 -water-carbonate rock system and analysis on its CO_2 sources: Examples from Huanglong Ravine and Kangding, Sichuan, and Xiage, Zhongdian, Yunnan[J]. *Science in China: Series D*, **43**(6): 569–576.
- Mogi K, Mochizuki H, Kurokawa Y. 1989. Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes[J]. *Tectonophysics*, **159**(1/2): 95–108.
- Poirtrasson F, Dundas S H, Toutain J P, Munoz M, Rigo A. 1999. Earthquake-related elemental and isotopic lead anomaly in a springwater[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **169**(3/4): 269–276.
- Silver P G, Valette-Silver N J. 1992. Detection of hydrothermal precursors to large northern California earthquakes[J]. *Science*, **257**(5075): 1363–1368.
- Song S R, Ku W Y, Chen Y L, Liu C M, Chen H F, Chan P S, Chen Y G, Yang T F, Chen C H, Liu T K, Lee M. 2006. Hydrogeochemical anomalies in the springs of the Chiayi area in west-central Taiwan as possible precursors to earthquakes[J]. *Pure Appl Geophys*, **163**(4): 675–691.
- Toutain J P, Munoz M, Poirtrasson F, Lienard A C. 1997. Springwater chloride ion anomaly prior to a $M_{\text{L}}=5.2$ Pyrenean earthquake[J]. *Earth Planet Sci Lett*, **149**(1/2/3/4): 113–119.