

李见,张翔,杨志坚,等. 漾濞6.4级地震前后大理地区温泉水化学组分特征分析[J]. 华南地震, 2022, 42(3): 36-47. [LI Jian, ZHANG Xiang, YANG Zhijian, et al. Analysis of Chemical Composition Characteristics of Hot Spring Water in Dali Area Before and After the Yangbi M6.4 Earthquake [J]. South China journal of seismology, 2022, 42(3): 36-47]

漾濞6.4级地震前后大理地区 温泉水化学组分特征分析

李见, 张翔, 杨志坚, 李朝明, 段美芳

(云南省地震局, 昆明 650224)

摘要: 2021年6月21日在云南省大理白族自治州漾濞县发生M6.4级地震。通过对大理地区主要断裂带温泉水化学组分每季度定期取样观测, 分析该区地下水的化学类型、成因及其与地震活动的关系。测定、分析结果显示: 洱源温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型水, 白总旗温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型水, 高芹、剑川、永胜、漕涧温泉均属于 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水; 温泉水氨水汞背景值高, 具有一定的区域性; 洱源, 弥渡, 剑川温泉可能受大理地区广泛分布的石炭-二叠系海相沉积灰岩影响, 显示较高的 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 含量; 漾濞6.4级地震前后区域内温泉水的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、水汞、水氨含量有明显变化, 白总旗温泉 Cl^- 、永胜、洱源温泉 SO_4^{2-} 以及高芹温泉水汞含量在漾濞6.4级地震前明显上升, 震后含量显著下降, 温泉水温和固体 CO_2 含量变化不明显。

关键词: 漾濞M6.4地震; 地球化学; 温泉; 离子浓度; 前兆异常

中图分类号: P315.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)03-0036-12

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.03.05

Analysis of Chemical Composition Characteristics of Hot Spring Water in Dali Area Before and After the Yangbi M6.4 Earthquake

LI Jian, ZHANG Xiang, YANG Zhijian, LI Zhaoming, DUAN Meifang

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China)

Abstract: An M6.4 earthquake occurred in Yangbi County, Dali Bai Autonomous Prefecture, Yunnan Province On June 21st, 2021. By sampling and observing the chemical components of the hot spring water in the main fault zones in Dali area every quarter, the paper analyzes the chemical types and causes of groundwater in this area and their relationship with seismic activity. The measurement and analysis results show that: Eryuan hot spring belongs to $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ type water, Baizongqi hot spring belongs to $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ type water, Gaoqin, Jianchuan,

收稿日期: 2022-03-10

基金项目: 云南省地震局自立科研项目(漾濞地震专项)(2021YBZX11)和云南省地震局传帮带(CQ3-2021005)联合资助。

作者简介: 李见(1994-), 本科, 助理工程师, 主要从事地震地质, 震源机制, 地震流体监测研究。

E-mail: 1586094020@qq.com

Yongsheng and Caojian hot springs all belong to HCO_3^- -Na type water; the background value of radon and mercury in hot spring water is high and has a certain regional; Eryuan, Midu and Jianchuan hot springs may be influenced by the Carboniferous-Permian marine sedimentary limestone widely distributed in Dali area, showing high HCO_3^- , Ca^{2+} content; the contents of Cl^- , SO_4^{2-} , mercury and radon in hot spring water in the area before and after the Yangbi M6.4 earthquake changed significantly. The content of Cl^- in Baizongqi hot spring, SO_4^{2-} in Yongsheng and Eryuan hot springs, and the mercury content in Gaoqin hot springs increased significantly before the Yangbi M6.4 earthquake, and decreased significantly after the earthquake. The temperature of hot spring water temperature and solid CO_2 content did not change significantly.

Keywords: Yangbi M6.4 earthquake; Geochemistry; Hot spring; Ion concentration; Precursory anomaly

0 引言

流体在地球动力学过程中有不可或缺的作用,水文地球化学在地震监测预测方面得到广泛应用,地震常伴有流体各组分地球化学异常变化,地下流体异常对地震孕震区及其外围区域介质的变化有较为灵敏的响应,某些强震前会出现地下流体群体性异常变化^[1-3]。2007年普洱地震震前后温泉水中氟离子发生明显变化^[4],2008年汶川大地震伴有地下水位和流体地球化学异常现象^[5],2008年汶川8.0级地震前后的5月1日至7月4日,距震中约400 km的重庆北温泉群所有温泉的水温下降了1℃左右,震后海拔较低泉点 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 浓度大幅降低^[6],2015年阿左旗5.8级地震,周围区域的水化学组成变化较大,对地震响应较为敏感^[7]。

2021年5月21日21时48分37秒(北京时间),在云南省大理白族自治州漾濞县(25.67°N, 99.87°E)发生M6.4级地震,震源深度8 km。雷兴林等^[8]对漾濞地震特征和成因进行研究,认为漾濞地震受深部流体作用的影响明显,漾濞地震后的流体特征需要进一步研究。此次漾濞 M_s 6.4地震发生于滇西北地区,该区域历史上 $M \geq 6.0$ 地震频发,且大多数地震发生于主要断裂及其附近区域,2013年3月以来,滇西北地区 $M_L \geq 4.0$ 地震显著增强,且主要集中分布在维西—乔后断裂、程海断裂及其附近地区。刘自凤等^[9]研究了滇西北地区 b 值以及其应力张量方差的空间扫描,显示出程海断裂、龙蟠—乔后断裂和维西—乔后断裂南段及邻区低值变化特征相对显著,认为强震发生的可能性大。基于强震危险性的较大背景,从2019年开始,对大理地区主体断裂(维西—乔后断裂、程海断裂、红河断裂等)附近6个温泉每季度定期进行采样观测,主要测定断裂附近温泉水体的水氡、水汞、水体主要阴离子、固体 CO_2 、电导率、pH值、水

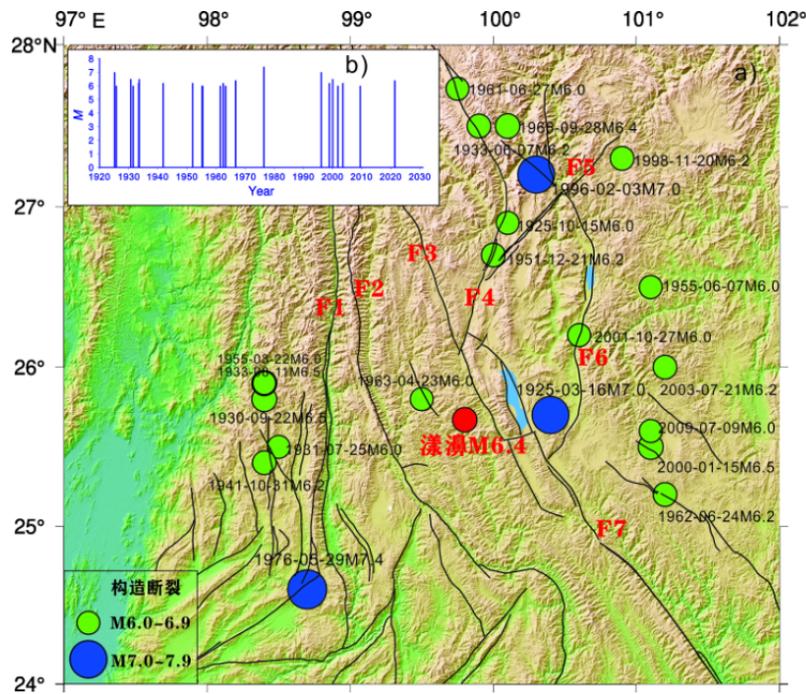
温等地球化学量;此次漾濞6.4级地震后,也及时对区域内温泉开展了现场采样观测。共获得6个温泉震前震后8组连续流动观测数据。因此,本文通过分析漾濞6.4级地震前后大理地区温泉水化学组分,分析该地区温泉水文地球化学变化规律,探索温泉水地球化学特征变化与漾濞地震的关系。研究成果不仅对认识该区温泉水地球化学特征及其演化有重要意义,而且对探索和改进利用该区温泉水化学组分进行地震预测的方法也具有重要意义。

1 地质背景

从构造上看,漾濞M6.4地震发生在川滇菱形块体西侧的印支块体上,印支地块自西向东分为三个次级构造单元:临沧花岗岩带、澜沧江断裂带和兰坪—思茅盆地。兰坪—思茅盆地内部构造复杂,发育了早期的逆冲断层、推覆构造与晚期的走滑构造断层^[10-11]。此次地震发生在兰坪—思茅盆地内,离东侧维西—乔后—巍山断裂约20 km(图1)。维西—乔后—巍山断裂带,北起雪龙山东麓白济汛一带,经维西、通甸、乔后,止于巍山盆地南端,走向北北西,倾向NE/NW,长约280 km。大致以玉狮场、平坡为界,可将断裂分为北段、中段和南段3段,是一条走滑兼正断的活动断裂^[12-13]。该区域是青藏高原物质向东南侧挤出的通道^[14],也是特提斯—喜马拉雅构造域东南部弧形构造转折处,处于川滇菱形块体西南边界红河断裂带与近南北向丽江—大理断裂系统的交汇区及应力集中带^[15]。区域内强震频发,图1b给出了1925年有仪器记录以来的 $M \geq 6.0$ 级地震 $M-T$ 图,包括漾濞M6.4级地震在内,共发生了22次6级以上地震,占同时期云南地区地震的34%,最近的一次强震频发时段是1996—2003年,期间发生1次丽江7.0级地震,4次 $M \geq 6.0$ 级地震。漾濞M6.4

级地震与上一次地震相隔12年。大理地区位于红河断裂带北端，构造上表现为一系列近SN向及NNE向的活动断裂，如离此次漾濞地震约20 km的

维西—乔后—巍山断裂，中新世以来的断陷盆地从南北两个方向逐渐向NW走向的红河断裂交会，构成断裂东北侧典型的滇西北伸展裂陷区^[16]。



F1:怒江断裂;F2:澜沧江断裂;F3:维西—乔后—巍山断裂;F4:龙蟠—乔后断裂;F5:剑川—文化断裂;
F6:程海—宾川断裂;F7:红河断裂带北段

图1 区域构造与历史地震震中分布

Fig.1 Regional tectonics and epicenters distribution of the historical earthquakes

此次定期观测的6个温泉为：洱源县牛街乡练渡村温泉(以下简称洱源温泉)，永胜县片角镇热河村温泉(以下简称永胜温泉)，弥渡县弥城镇高芹温泉(以下简称高芹温泉)，弥渡县弥城镇白总旗温泉(以下简称白总旗温泉)，云龙县漕涧下澡堂温泉(以下简称云龙温泉)，剑川县老君山新和村温泉(以下简称剑川温泉)，位置如图2所示，除剑川温泉离漾濞6.4级地震震中距为104 km，其余温泉震中距都在100 km内(表1)。洱源温泉位于红河断裂和丽江—剑川断裂交互处，该区内构造体系呈SN向展布，为地下热水提供循环通道;洱源盆地基底有大面积的多期岩浆侵入玄武岩，为地下热水提供热源;基底上覆中、新生界碎屑岩和冲湖积黏土层组成良好隔热保温层，三者构成良好的储热构造^[17]。弥渡高芹温泉、白总旗温泉近红河断裂南段，弥渡盆地及周边山区的碳酸盐岩破碎带地区是该区域地下水的补给区，大气降水沿岩溶裂隙及构造裂隙向深部运移获得热量形成深远

高温热水，在盆地总体的由北至南的地下水流动方向上，运移至温泉出露区域，受致密岩体或者压性断裂带阻拦，热水沿构造上升出露成泉^[18]。云龙温泉位于兰坪—永平断裂西侧，该区位于怒江及澜沧江沿岸地下热水密集区，属于中低温水热型地热类型，地壳地温梯度为4℃/100 m^[19]。区域内出露地层的岩性以紫红色砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩和泥岩为特征，统称红层^[20]。剑川温泉位于维西—乔后断裂附近，出露于黄色砂岩的裂缝中，处于兰坪—思茅盆地的边缘^[21]，位于我国著名的滇藏地热带内，地热活动强烈，构造复杂，不同构造体系的断裂互相重合、交接、穿插，为地下热水将深部热量带至地壳浅表、孕育高温水热系统、产生强烈水热活动提供了重要的构造条件^[22]。永胜温泉位于程海—宾川断裂红岩坡段，程海—宾川断裂可分为八段，为最南段，区域内活动断裂发育，程海断裂纵贯^[23]。

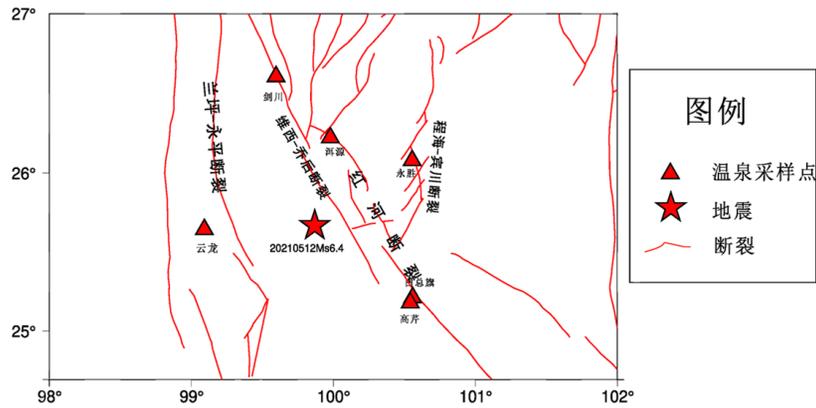


图2 温泉取样点分布图

Fig.2 Distribution map of hot spring sampling points

表1 温泉基本信息表

Table 1 Basic information sheet of hot spring

温泉名称	经度/(°)	纬度/(°)	震中距/km	高程/m
洱源温泉	99.99	26.25	66	2058
永胜温泉	100.56	26.10	84	1239
高芹温泉	100.50	25.30	75	1662
白总旗温泉	100.51	25.34	72	1685
云龙温泉	99.05	25.68	82	1650
剑川温泉	99.61	26.58	104	2612

2 水化学组分特征分析

对6个温泉点分别于2020年5、7、9、11月, 2021年3、5、8、11月共8次观测采样, 获得温泉水氢、水汞、固体CO₂、阴离子、pH、电导率的连续8次观测数据, 以及温泉阳离子数据(无连续数据)。水氢、水汞分别采用RAD7测氡仪和RA-

915W测汞仪野外现场测定, 其余取样实验室测定; 温泉固体CO₂利用沉淀法获取, 取50 mL温泉水样, 加入过量饱和Ba(OH)₂溶液, 将BaCO₃沉淀洗净过滤、烘干, 计算固体CO₂值; 用intergration离子色谱仪测定常量元素, 仪器RSD%在5%以内, 电导率为0.1 nS/cm, HCO₃⁻用滴定法测定。数据见表2、表3。

表2 温泉采样时间、水化学数据

Table 2 Sampling time and water chemistry data of hot spring

温泉名	时间/年-月	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	水温/ (°C)	水氢/ (Bq·L ⁻¹)	水汞/ (ng·L ⁻¹)	固体CO ₂ /mg	pH	电导率/ (nS·cm ⁻¹)
洱源牛街炼 渡温泉	2020-05	22.70	155.2	74.9	24.4	5.5	244	6.91	1.12
	2020-07	19.85	72.9	76.0	38.3	4.7	167	6.64	1.34
	2020-09	20.35	150.3	75.8	39.0	2.5	262	6.93	1.26
	2020-11	19.64	71.9	73.5	25.4	4.0	239	6.98	1.13
	2021-03	25.80	191.8	74.0	29.9	4.3	245	6.78	1.18
	2021-06	21.95	151.0	74.3	22.5	3.3	246	6.92	1.31
	2021-08	27.11	147.1	74.3	16.3	4.0	257	6.84	1.21
	2021-11	23.86	152.8	74.0	21.4	4.0	216	6.72	1.08

(转下表)

(接表2)

温泉名	时间/年-月	Cl ⁻ / (mg · L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg · L ⁻¹)	水温/ (℃)	水氡/ (Bq · L ⁻¹)	水汞/ (ng · L ⁻¹)	固体CO ₂ /mg	pH	电导率/ (nS · cm ⁻¹)
弥渡白总旗 温泉	2020-05	53.29	29.6	55.3	18.4	16.2	133	6.85	0.65
	2020-07	42.79	23.6	55.4	22.8	15.5	145	6.81	0.74
	2020-09	48.00	35.3	55.4	15.3	10.0	139	7.08	0.69
	2020-11	48.85	33.6	55.5	18.1	17.0	112	7.02	0.63
	2021-03	86.60	36.0	55.3	20.3	15.4	127	6.91	0.64
	2021-05	50.47	32.7	55.5	20.9	17.2	129	7.06	0.69
	2021-08	42.54	26.1	55.5	17.7	18.3	138	6.87	0.62
	2021-11	45.90	34.8	55.4	24.7	15.3	108	6.79	0.62
弥渡高芹 温泉	2020-05	3.27	117.6	66.3	3.1	384.2	112	6.98	0.75
	2020-07	2.66	51.5	66.4	12.1	402.2	171	6.73	0.87
	2020-09	3.85	112.9	66.4	1.8	380.3	167	7.12	0.83
	2020-11	3.50	108.9	67.0	6.8	385.9	146	6.97	0.74
	2021-03	4.20	66.4	66.3	4.7	451.4	151	6.99	0.75
	2021-05	3.50	106.1	66.6	4.8	462.2	164	7.22	0.83
	2021-08	1.74	64.3	66.7	8.2	295.1	159	6.91	0.78
	2021-11	3.10	116.6	66.5	10.1	383.6	80	6.8	0.72
剑川温泉	2020-05	1.14	32.8	52.1	58.7	20.3	130	7.05	0.69
	2020-07	0.22	38.4	52.1	82.7	15.0	267	6.88	0.72
	2020-09	0.60	40.5	52.3	72.2	20.9	160	7.06	0.68
	2020-11	5.45	39.1	52.2	44.3	14.5	139	7.03	0.62
	2021-03	4.60	32.5	52.0	69.2	22.4	149	6.96	0.62
	2021-06	0.05	29.8	52.5	55.4	17.2	149	7.07	0.72
	2021-08	1.71	37.7	52.2	54.9	24.2	148	6.92	0.68
	2021-11	0.10	36.1	52.5	35.0	15.7	116	6.83	0.62
永胜温泉	2020-05	11.47	16.5	51.0	6.8	55.7	38	7.29	0.36
	2020-07	8.22	15.0	51.0	67.6	76.7	64	7.47	0.38
	2020-09	8.34	16.7	51.0	43.1	72.5	69	7.54	0.36
	2020-11	11.37	18.2	50.8	22.4	84.5	46	7.35	0.32
	2021-03	14.80	23.8	51.0	8.0	81.1	51	7.38	0.33
	2021-05	6.50	0.4	52.5	5.8	83.4	67	7.29	0.34
	2021-08	9.32	15.6	52.1	3.6	98.1	57	7.26	0.37
	2021-11	8.63	16.7	51.6	5.2	65.9	33	7.15	0.32
云龙温泉	2020-05	5.10	11.2	66.7	251.0	36.4	54	7.03	0.25
	2020-07	2.64	1.1	67.0	203.0	57.4	35	7.1	0.26
	2020-09	4.36	10.9	67.1	152.0	19.1	72	7.24	0.25
	2020-11	4.50	7.4	67.0	55.5	48.2	55	7.19	0.22
	2021-03	2.25	6.5	67.3	173.0	62.2	63	7.09	0.23
	2021-06	3.04	10.7	67.2	123.0	32.8	71	7.17	0.30
	2021-08	5.65	15.2	67.3	283.0	9.3	64	7.02	0.25
	2021-11	6.71	10.4	67.3	85.5	21.1	35	6.98	0.22

表3 温泉水样主要阴阳离子组分(2021年8月)
Table 3 Main anion and cation components of hot spring water samples(August 2021)

温泉名	主要阴离子/(mg·L ⁻¹)				主要阳离子/(mg·L ⁻¹)			
	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Na ⁺	Mg ²⁺
洱源牛街炼渡	3.4	27.11	147.1	627.5	33.2	76.5	219.3	15.3
弥渡白总旗	0.4	42.54	26.14	354.8	15.5	47.3	100.1	12.9
弥渡高芹	1.8	3.25	64.3	413.3	15.0	36.5	159.4	8.8
剑川新和	0.3	1.71	37.7	419.3	7.4	12.1	170.2	1.0
永胜片角	2	9.32	15.57	178.0	0.6	0.5	87.8	0.1
云龙曹洞	7.6	5.65	15.2	131.5	1.3	1.4	58.5	0.2

Piper图解和Na-K-Mg三角图解常被用来评价水-岩化学平衡状态、区分不同类型水样以及判断地下水循环深度^[24]。从Piper图可见(图3),洱源温泉属于HCO₃·SO₄-Na型水,白总旗温泉属于HCO₃·Cl-Na型水,高芹、剑川、永胜、云龙温泉均属于HCO₃-Na型水。6个温泉常量离子组分测试结果(表2、表3)显示,6个温泉所含阴离子均以HCO₃⁻占绝对优势,阳离子均以Na⁺占绝对优势,这可能和钠的强溶解性和强迁移性有关。洱源,高芹,白总旗,剑川温泉Na⁺占阳离子组分60%左右,且富含K⁺和Ca₂⁺,反映出这4个温泉可能受到岩浆岩和碳酸盐岩的共同影响,大理地区广泛分布石炭—二叠系海相沉积灰岩,较高的

HCO₃⁻、Ca₂⁺含量可能与灰岩的溶解有关,该区同时分布喜山期碱性岩浆岩,这或许导致了较高的Na⁺、K⁺;不同的是云龙和永胜温泉主体为Na⁺,但K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺等阳离子基本很少,这可能和离子交换作用有关,K⁺、Ca²⁺、Mg²⁺吸附能力强于Na⁺,围岩中的钠离子置换钙镁离子。从样品的Na-K-Mg平衡图解(图4)可见,永胜温泉水属于部分成熟水,表明其发生部分水岩反应,温泉水与围岩的反应达到部分平衡状态;其余温泉为未成熟水,且靠近Mg^{1/2}端,表明其水岩反应较强,属于浅层水区域。6个温泉的pH为6.64~7.54之间,中性;电导率为0.22~1.34之间,6个温泉pH和电导率多次测值变化不大,数据较稳定。

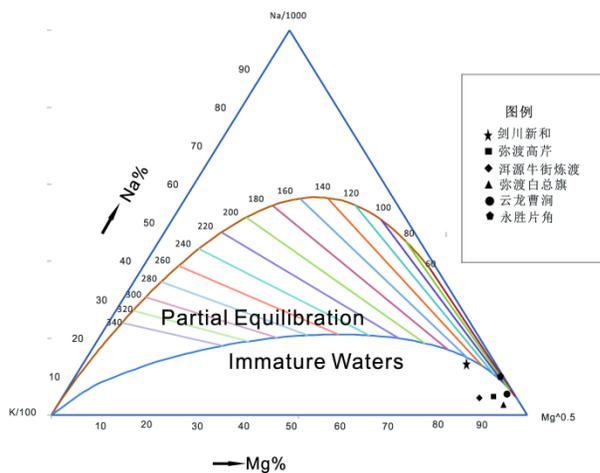


图3 温泉水的Piper图解

Fig.3 Piper diagram of hot spring water

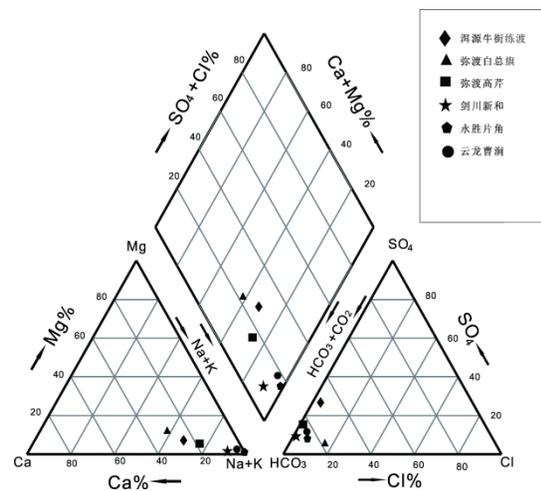


图4 温泉水的Na-K-Mg图解

Fig.4 Na-K-Mg ternary diagram of hot spring water

3 各化学组分时空分布特征

3.1 各化学化学组分空间分布特征

根据不同的温泉各组分空间分布图(图5)可以看出: K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、温泉水温(T)存在差异。区域内温泉都为中高温温泉($40^\circ C \sim 70^\circ C$)，高温温泉($60^\circ C \sim 80^\circ C$)有洱源温泉，白总旗温泉和云龙温泉，中温温泉有剑川温泉，高芹温泉，永胜温泉，这和前人研究基本吻合^[25]。洱源温泉的阴阳离子含量、水温(T)和固体 CO_2 含量均最高， SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度分别达 147.1 mg/L、627.5 mg/L、76.5 mg/L、219.3 mg/L、水温 $74.0^\circ C$ ，固体 CO_2 值最高达到 262 mg/L。大理地区广泛分布石炭—二叠系海相沉积灰岩，同时洱源地区温泉的 CO_2 更多来源以地幔来源和变质成因混合的深部来源 CO_2 ^[24]，极高的 HCO_3^- 和固体 CO_2 值可能受碳酸盐矿物溶解和深部来源共同影响。洱源盆地基底有大面积的多期岩浆侵入玄武岩，洱源温泉可能同时受到岩浆岩和碳酸盐岩的共同影响，且温泉水溶蚀了沉积岩中的石膏或者其他硫酸盐矿物；大面积的多期岩浆侵入玄武岩，以及上覆的中、新生界碎屑岩和冲湖积黏土层良好的储热构造，可能是导致洱源温泉水温较高的主要原因。云龙和永胜温泉各水化学组分均含量较低(图5)，较低的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量，可能和离子交换作用有关，即围岩中的钠离子置换钙镁离子；弥渡白总旗温泉和高芹温泉 HCO_3^- 含量(413.3 mg/L)和固体 CO_2 含量较高，弥渡盆地及周边山区的碳酸盐岩破碎带地区是该区域地下水的补给区^[18]，这或许导致相对较高的 HCO_3^- 和固体 CO_2 含量。各温泉水氡，水汞差异性较大，位于兰坪—永平断裂西侧的云龙温泉的水氡含量最高，最高达到 283 Bq/L，漾濞地震震中东南侧红河断裂，程海—宾川断裂附近的洱源、白总旗、高芹、永胜温泉水氡含量较低，基本在 20 Bq/L 以下。弥渡高芹温泉水汞含量最高，最高达 462.2 ng/L，但弥渡地区的白总旗温泉和高芹温泉同处红河断裂附近，其水汞含量相对较低，仅为 15 ng/L 左右，显示出不同断裂带及同一断裂带上不同区位的温泉水汞，水氡背景值各不相同，具有一定的区域性。

3.2 水化学组分时间变化

以漾濞 6.4 级地震前 2021 年 3 月采集的水样为第一批水样，计算 6 个温泉后续各批水样水化学参数相对于各自的第 1 批水样各参数的变化率并作图(图6)。地震前后各化学参数的变化率分析发现，漾濞地震后各断裂带温泉水的化学参数出现了不同程度的变化。阴离子主要表现在 Cl^- 、 SO_4^{2-} 出现不同程度的变化，除云龙温泉的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 变化幅度为正，明显上升，其余温泉均表现出震后下降趋势，且变化幅度较大，如剑川温泉 Cl^- 下降幅度最大，相对震前采集的水样，下降幅度分别达到 99%、63%、98%；永胜温泉 SO_4^{2-} 相对第一批水样，其下降幅度达到 98%。水氡，水汞相对震前水样，部分温泉为上升趋势，除高芹水氡外，变化幅度不大，基本在 20% 以内；其余大部分温泉变化幅度为负，表现为显著下降趋势，如高芹温泉水汞在震前达到高值，后持续下降，下降幅度约 40%。

根据漾濞地震前后大理地区各温泉水化学参数随时间变化图(图7)分析显示。位于红河断裂附近的弥渡高芹，白总旗温泉、维西—乔后断裂附近的剑川温泉、程海—宾川断裂附近的永胜温泉的 Cl^- 浓度存在同步变化趋势，均在漾濞地震前出现明显上升，后迅速下降发生地震，地震后降至上升前水平，剑川，白总旗温泉变化最为显著，如剑川温泉 Cl^- 从震前的 4.6 mg/L 降至 0.05 mg/L(图 7a, 7b)。永胜温泉 SO_4^{2-} 在漾濞地震前升至较高值后突然下降，由 2021 年 3 月 23.8 mg/L 下降至 5 月 19 日 0.4 mg/L，下降幅度达到 98%(图 7c)，洱源温泉具有季节性变化趋势，漾濞地震前打破季节性趋势，其余温泉 SO_4^{2-} 变化不明显，弥渡高芹温泉受季节性变化影响，长期趋势稳定。高芹温泉水汞反应较为灵敏，震前明显升高，后持续下降发生地震，由震前 462 ng/L 下降 295 ng/L；云龙温泉水汞存在相同趋势，但对比上一年度变化，可能和季节性有关。永胜水氡从 2020 年 7 月开始持续一年多下降，漾濞地震发生时处于较低值。6 个温泉的固体 CO_2 表现出一定季节性变规律，变化不明显。

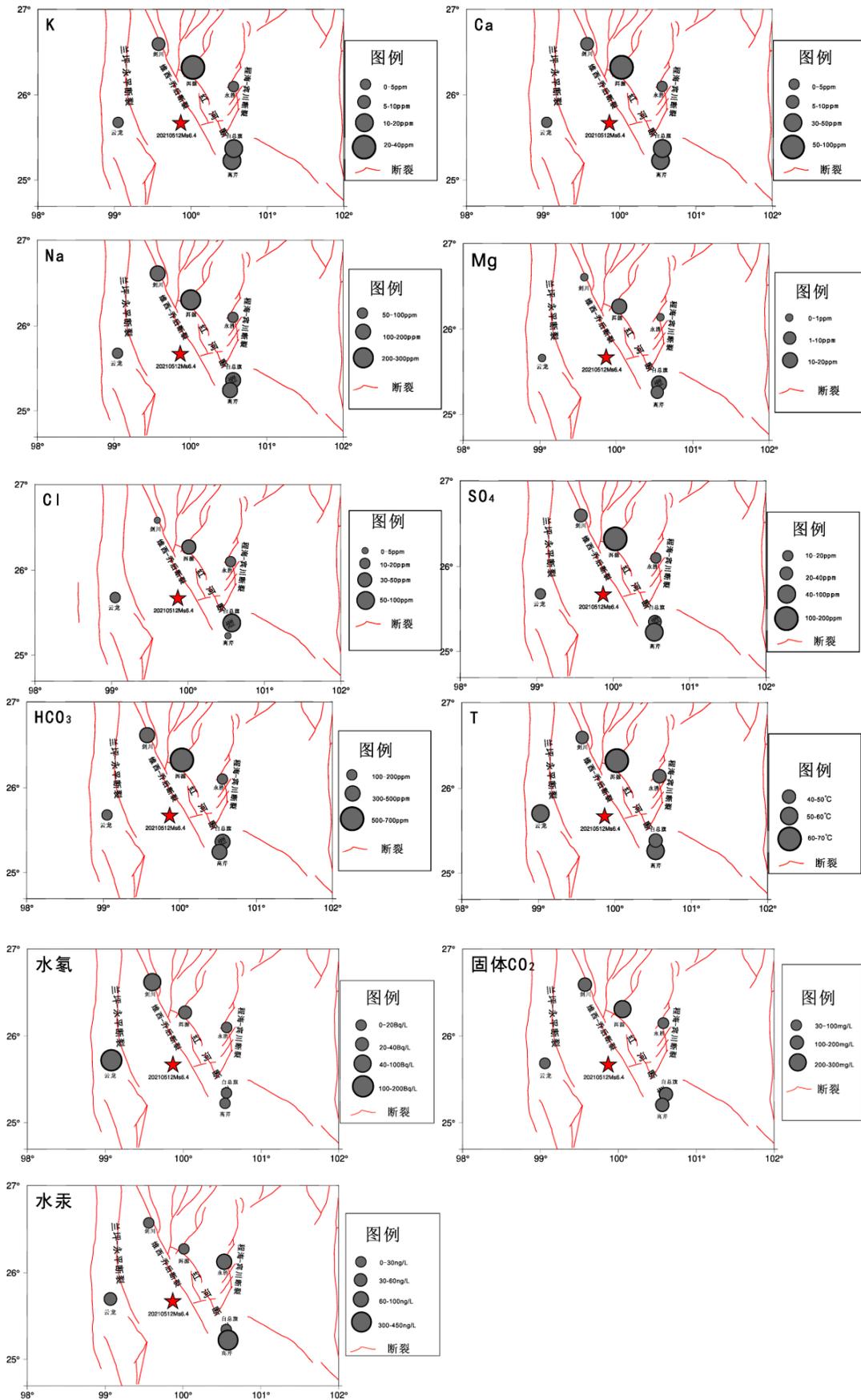


图5 温泉各组分的空间分布图
 Fig.5 Spatial distribution of components in hot springs

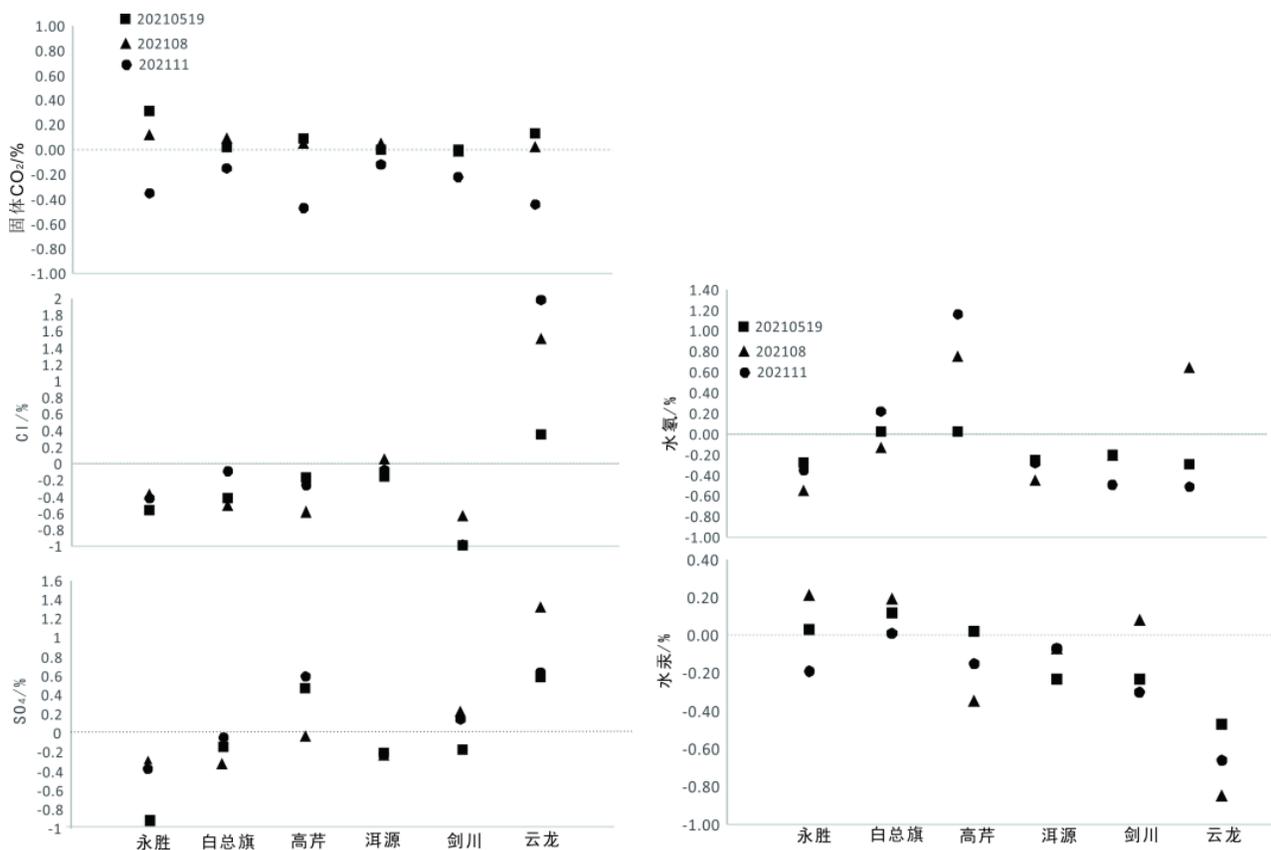
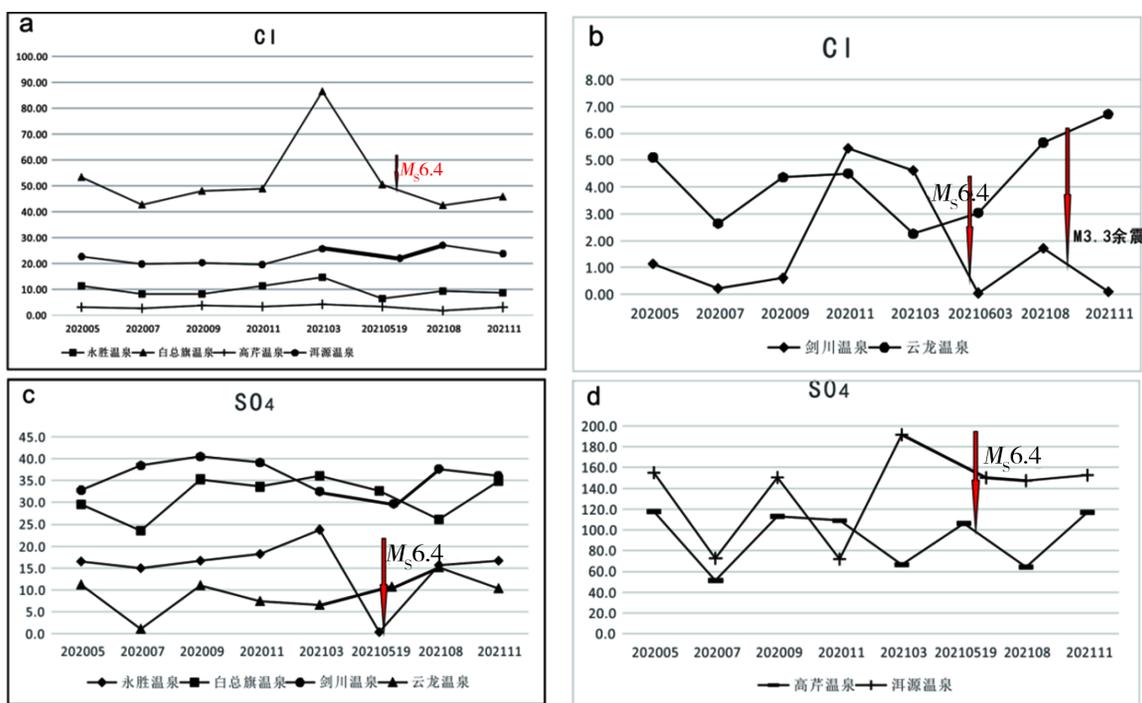


图6 温泉各组分浓度的相对变化率

Fig.6 The relative change rate of the concentration of each component in the hot spring



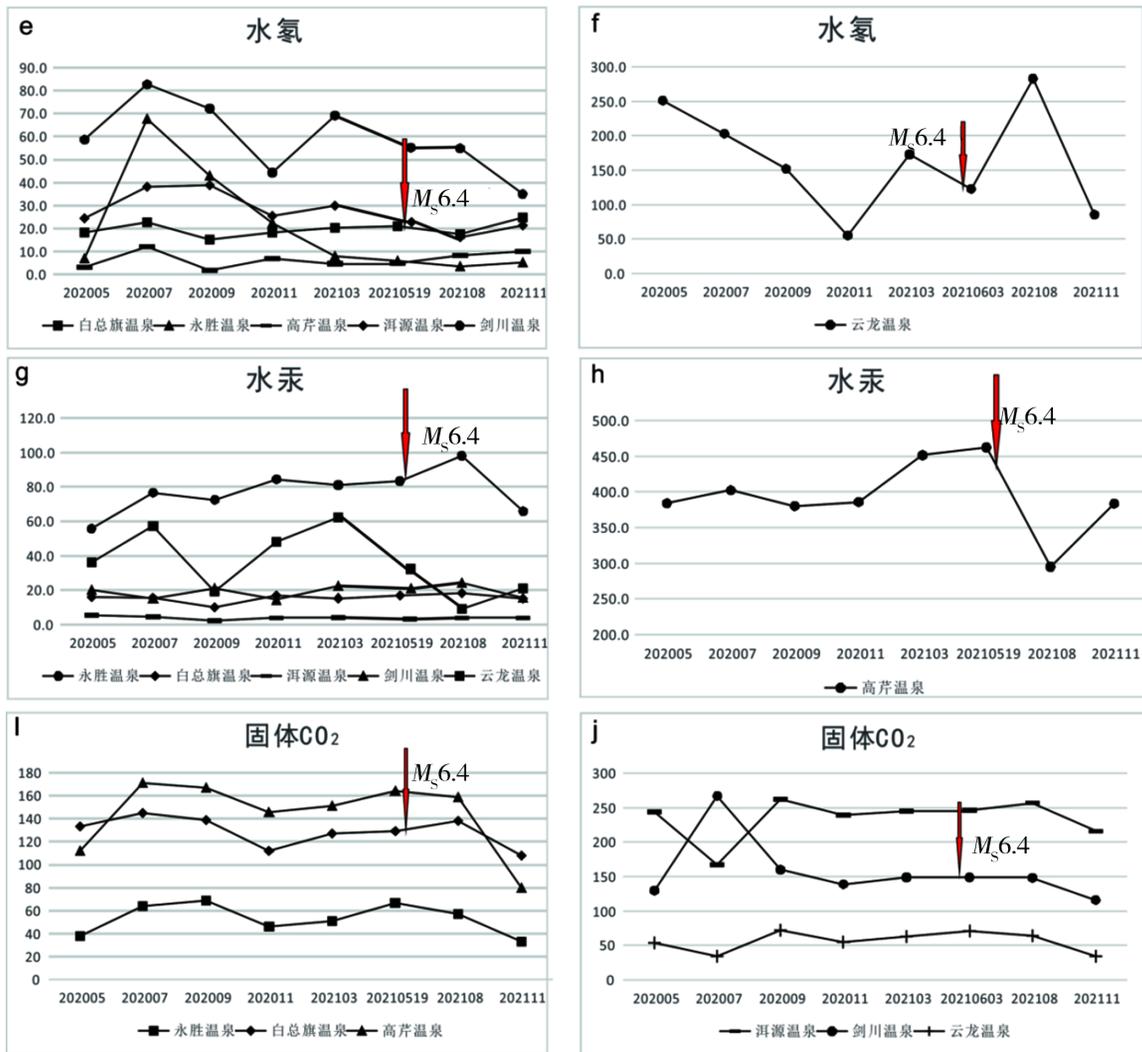


图7 温泉各化学组分浓度时间变化图

Fig.7 Time variation of chemical components in hot springs

4 温泉水的地球化学变化与漾濞6.4级地震的关系

根据前文分析显示,漾濞6.4级地震前后区域内温泉水的化学参数主要表现在Cl⁻和SO₄²⁻浓度以及温泉水氢、水汞含量出现不同程度的变化,Cl⁻和SO₄²⁻变化最为显著,如剑川温泉Cl⁻,永胜温泉SO₄²⁻,相对震前采集的水样,下降幅度都达到98%以上,温泉的水温和固体CO₂变化不明显。总体显示出漾濞6.4级地震前大多数温泉Cl⁻、SO₄²⁻、水氢、水汞浓度震前出现明显上升,震后各组分含量显著下降。许多学者对地下水前兆异常的机制进行了研究,提出了许多解释地下水前兆异常机制的模型^[27-30],其中含水层破裂/流体混合模型

(AB/FM模型)认为隔离含水层之间的水文屏障的前兆破裂,从而使不同含水层发生混合,而这种前兆破裂是由地震前与应力积累相关的地壳膨胀引起的。大理地区6个温泉的水化学变化现象可以用AB/FM模型机制解释。

前人研究滇西北地区b值和应力张量方差的空间扫描结果显示程海断裂、龙蟠—乔后断裂和维西—乔后断裂南段及邻区低值变化特征相对显著,这可能是区域应力水平增强的表现^[9],此次研究Cl⁻和SO₄²⁻震前升高,震后剧烈下降的剑川,永胜,白总旗,高芹等温泉刚好在这些断裂附近。剑川温泉位于维西—乔后断裂附近,永胜温泉位于程海—宾川断裂红岩坡段,白总旗和高芹温泉近红河断裂南段。既区域应力积累增加,孕震区的岩石的内部结构经历岩石的弹性压缩、原生裂

隙的闭合、新微裂隙的产生、裂隙的弥散发展、裂隙的集结到岩石的宏观破裂的演化过程^[26], 演化过程中深部流体扩散上升、不同层位水体的混合以及孔隙流体的受挤压流体岩石间的相互作用导致地下流体水化组分的异常变化^[27-30]。洱源温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型水, 白总旗温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型水, 高芹、剑川、永胜、云龙温泉均属于 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水, 虽然这些温泉有一定含量的 Cl^- 和 SO_4^{2-} , 却不是温泉的主量化学元素, 而 SO_4^{2-} 及 Cl^- 除少量的地表来源外, 主要为中、深部来源^[7], 这些温泉水较高的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度可能主要来源于深部高 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度水的混入, 地震孕育过程中, 区域压应力增强导致高 Cl^- 、 SO_4^{2-} 浓度的深部水供给量的增加所致, 地震后, 随着区域应力的调整, 深部供给的流体量减少, 各温泉的离子浓度下降。

5 结论

(1) 大理地区主要活动断裂附近 6 个温泉主要为中高温温泉, 洱源温泉温度最高, 约 74.5°C 。温泉水的常量离子分析表明, 阳离子主要以 Na^+ 为主, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量不高且差异较大, 位于程海—宾川断裂的永胜温泉和兰坪—永平断裂附近的云龙温泉 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 含量极少, 阴离子以 HCO_3^- 为主, 较高的 HCO_3^- 和固体 CO_2 含量可能受大理地区广泛分布的石炭—二叠系海相沉积灰岩影响。洱源温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型水, 白总旗温泉属于 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Na}$ 型水, 高芹、剑川、永胜、漕涧温泉均属于 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型水。永胜温泉水属于部分成熟水, 其余温泉为未成熟水。区域内温泉有较高水氦水汞背景值, 不同断裂带及同一断裂带上不同区位的温泉水汞, 水氦背景值各不相同, 具有一定的区域性。

(2) 漾濞 6.4 级地震前后大理地区主要断裂附近温泉水的 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、水汞、水氦含量有明显变化, 白总旗温泉 Cl^- , 永胜、洱源温泉 SO_4^{2-} 以及高芹温泉水汞含量在漾濞 6.4 级地震前明显上升, 震后含量显著下降; 可能是震前区域挤压应力增强过程高 Cl^- 和 SO_4^{2-} 水体的混入, 震后区域应力的调整, 中深部流体量补给量减少, 各化学组分多数含量下降; 温泉水温和固体 CO_2 含量变化不明显。

参考文献

- [1] 刘耀炜, 任宏微, 张磊, 等. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 1-12.
- [2] 车用太, 鱼金子, 等. 地震地下流体力学[M]. 北京: 地震出版社, 2006.
- [3] 付虹, 邬成栋, 刘强, 等. 印尼巨大地震引起的云南水位异常记录及其意义[J]. 地震地质, 2007, 29(4): 873-882.
- [4] Du J, Si X, Chen Y, et al. Geochemical anomalies connected with great earthquake in China[C]//Stefansson O, ed. Geochemistry Research Advances. New York: Nova Science Publishers, 2008: 57-92.
- [5] 周晓成. 汶川 $M_s 8.0$ 地震后川西地区的气体地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
- [6] 肖琼, 沈立成, 袁道先, 等. 重庆北温泉水化学特征对汶川级地震的响应[J]. 中国岩溶, 2009, 28(4): 385-390.
- [7] 孙凤霞, 崔月菊, 郑红巍, 等. 河套盆地边缘泉水化学组分对 2015 年 4 月 15 日阿左旗 $M_s 5.8$ 地震的响应[J]. 地震, 2016, 36(2): 106-117.
- [8] 雷兴林, 王伟志, 马胜利, 等. 关于 2021 年 5 月滇西漾濞 $M_s 6.4$ 地震序列特征及成因的初步研究[J]. 地震学报, 2021, 43(3): 261-286.
- [9] 刘自凤, 刘峰, 彭关灵, 等. 滇西北地区强震危险性分析[J]. 地震研究, 2019, 42(3): 331-337.
- [10] 刘俊来, 宋志杰, 曹淑云, 等. 印度—欧亚侧向碰撞带构造—岩浆演化的动力学背景与过程——以藏东三江地区构造演化为例[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 775-786.
- [11] 全亚博, 杨振宇, 张旭东, 等. 青藏高原东南缘晚新生代川滇地块旋扭构造体系地壳变形特征的古地磁学分析[J]. 地质学报, 2014, 88(11): 2057-2070.
- [12] 常祖峰, 常昊, 李鉴林, 等. 维西—乔后断裂南段正断层活动特征[J]. 地震研究, 2016, 39(4): 579-586.
- [13] 汤沛, 常祖峰. 维西—乔后断裂巍山盆地地段活动性研究[J]. 地质论评, 2013, 59(S1): 108-109.
- [14] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. 地质通报, 2015, 34(1): 1-31.
- [15] 李坪, 汪良谋. 云南川西地区地震地质基本特征的探讨[J]. 地质科学, 1975, 10(4): 308-326.
- [16] 向宏发, 韩竹军, 魏顺民, 等. 红河断裂带大型右旋走滑运动与伴生构造地貌变形[J]. 地震地质, 2004, 26(4): 597-610.
- [17] 杨惠. 云南省洱源县高氟温泉水中氟的来源及其推周边环境的影响分析[D]. 昆明: 云南师范大学, 2015.
- [18] 姚永仲. 弥渡温泉地质特及成因模式分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010.
- [19] 殷瑛, 王明珠, 何饶生. 云南地热资源及其开发利用[J]. 云南地质, 2006, 25(1): 70-75.
- [20] 杨苗林, 周训, 王晓翠, 等. 云南云龙和兰坪地区温泉中游离二氧化碳特征[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4):

- 157-163.
- [21] 杨苗林. 云南省云龙地区温泉水及盐泉特征[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2016.
- [22] 李其林, 王云, 周艺颖, 等. 剑川—德钦一带的地热异常: 对川滇菱块西北边界和地震活动性的意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(1): 91-102.
- [23] 周光全, 王晋南, 王绍晋, 等. 永胜6.0级地震的地质构造背景及发震构造[J]. 地震研究, 2002, 25(4): 357-361.
- [24] 张翔, 付虹, 罗睿洁, 等. 滇西大理地区部分温泉溶解CO₂及碳同位素组成特征研究[J]. 地震研究, 2021, 44(2): 186-191.
- [25] 颜鹏, 李如陶, 李四海, 等. 滇西地震预报实验场区温泉地球化学与断裂活动的关系[J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(2): 129-136.
- [26] 陈颖, 黄廷芳. 岩石物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001.
- [27] 刘耀炜, 陈华静, 车用太. 我国地震地下流体观测研究40年发展与展望[J]. 国际地震动态, 2006, (7): 3-12.
- [28] Inan S, Balderer W, Leuenberger F, et al. Springwater chemical anomalies prior to the $M_w=7.2$ Van earthquake (Turkey)[J]. *Geochemical Journal*, 2012, 46(1): 11-16.
- [29] Lei Xinglin, Wang Zhiwei, Ma Shengli, et al. A preliminary study on the characteristics and mechanism of the May 2021 $M_s 6.4$, Yangbi earthquake sequence, Yunnan, China[J]. *Acta seismologica sinica*, 2021, 43(3): 261-286
- [30] Liu Junlai, Song Zhijie, Cao Shuyun, et al. The dynamic setting and processes of tectonic and magmatic evolution of the oblique collision zone between India and Eurasian plates: Exemplified by the tectonic evolution of the Three River region, eastern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 775-786.
- [31] Tong Yabo, Yang Zhengyu, Zhang Xudong, et al. The paleomagnetic analysis about the later Cenozoic crustal deformation characteristics of the Chuandian terrane clockwise rotation system in the southeast edge of Tibet plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(11): 2057-2070.