

# 滇西大理地区部分温泉溶解 $\text{CO}_2$ 及 碳同位素组成特征研究\*

张翔, 付虹\*, 罗睿洁, 李波, 字承柱

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 温泉溶解  $\text{CO}_2$  的来源成因研究, 有利于判断与甄别研究区温泉溶解  $\text{CO}_2$  异常信息。对 2016 年 10 月至 2017 年 7 月大理地区 3 个温泉的水化学常量离子和  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  进行了 10 次重复取样观测, 对 3 个温泉的水文地球化学及  $\text{CO}_2$  来源进行分析。结果表明: 3 个温泉均属于  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$  型水, 地下水补给都来自于大气降水,  $\text{CO}_2$  主要来自于深部的地幔成因和变质成因的  $\text{CO}_2$ ; 2017 年漾濞  $M_s 5.1$  地震发生前, 3 个温泉的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  值与  $\text{HCO}_3^-$  正相关关系发生改变, 表明温泉  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  值与地震有一定的相关性。

**关键词:** 温泉; 水化学常量离子;  $\text{CO}_2$  和碳同位素组成; 地震; 大理

**中图分类号:** P314.12

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2021)02-0185-07

## 0 引言

流体在地球动力学过程中有不可或缺的作用。有研究表明, 高压流体是构造地震的活跃参与者, 如 Miller (2013) 发现压力过大的流体是慢滑地震和非火山地震的一种潜在成因机制。现代火山和活断裂带深部脱气释放的气体成分主要是  $\text{CO}_2$ 、水蒸气, 少量的  $\text{N}_2$ 、 $\text{H}_2$  及稀有气体等 (沈立成等, 2007; 周晓成等, 2016; 李其林等, 2019), 与火山活动、断裂作用和地震有成因关系的温泉, 往往是地球脱气作用的有利场所 (戴金星等, 1994)。一方面,  $\text{CO}_2$  的释放可能表明深部的高孔隙压, 断裂带破碎岩石中的高  $\text{CO}_2$  分压使正应力减小, 到一定程度时, 使断层发生滑移 (Irwin, Barnes, 1980)。断裂带中高浓度的  $\text{CO}_2$  流体形成  $\text{Ca}-\text{Mg}-\text{HCO}_3$  型水, 与断层面围岩发生蚀变反应逐渐形成水力联系网, 这将导致库仑破坏应力摩擦系数的降低, 并且当应力不能累积时, 导致断层蠕滑 (Weinlich, 2014)。因此, 可以利用  $\text{CO}_2$  释放来识别潜在的地震区域。另一方面, 因强震释放的深部高压  $\text{CO}_2$  引起的流

体压力脉冲可以触发强震的余震 (Miller, Colletti, 2004), 如 2015 年尼泊尔  $M_w 7.8$  地震后的数月, 观测到了与热液流体变化有关的  $\text{CO}_2$  释放。总之, 流体和地震的相互作用, 表明地震动态地影响着地壳的渗透性 (Girault *et al.*, 2018)。

在一些强震发生前, 地下流体  $\text{CO}_2$  的释放有明显的征兆性异常变化 (上官志冠等, 1993)。据前人的研究, 滇西地区温泉溶解  $\text{CO}_2$  总量在震前有一定反应 (上官志冠, 1987; 颜鹏等, 1997; 张启明, 2001), 但是对震前  $\text{CO}_2$  总量变化的成因机制研究较少。本文选取了滇西大理地区的 3 个温泉  $\text{CO}_2$  释放点, 在 2016 年 10 月至 2017 年 7 月进行了 10 次重复取样观测, 研究该地区的流体地球化学特征, 并分析这 3 个温泉的  $\text{CO}_2$  来源, 最后探讨 2017 年 3 月漾濞  $M_s 5.1$  地震前的  $\text{CO}_2$  释放特征。

## 1 地质背景

滇西地区地处冈瓦纳大陆与扬子陆块的接合部位, 经历了特提斯洋壳消减和印支期强烈的陆-陆碰撞形成造山带。自新生代以来, 该地区表

\* 收稿日期: 2019-07-02.

基金项目: 国家自然科学基金 (U1602223) 和中国地震局监测预报司震情跟踪课题任务 (2017010310) 联合资助.

第一作者简介: 张翔 (1989-), 工程师, 主要从事地下流体与地震预报研究. E-mail: 768310869@qq.com.

通讯作者简介: 付虹 (1963-), 研究员, 主要从事地震综合预测研究. E-mail: ynfuhong@qq.com.

现为大规模走滑、逆冲推覆、快速隆升。伴随近 EW 向的挤压缩短和逆冲推覆,哀牢山、苍山等地的古老变质岩被挤出隆升,这一时期总的构造背景以挤压为主,地壳在东西向上仍有加厚缩短的趋势(曾普胜等,2002)。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 向的活动断裂和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(向宏发等,2004)。

本文选取的 3 个温泉为:下关塘子铺温泉(以下简称“下关温泉”)、洱源兴兴澡堂温泉(以下简称“洱源温泉”)和弥渡石咀温泉(以下简称“弥渡温泉”),温泉位置如图 1 所示。下关温泉位于红河断裂次级断裂西洱河断裂上,西洱河断裂北盘为苍山变质岩含水层,南盘为含水性较差的中生代碎屑岩裂隙含水层。苍山变质岩裂隙水由高山向断裂带方向深部运移获得热量,至西洱河断裂带时,受巨厚碎屑岩阻挡,沿断裂带上升排出地表(苗慧帅,2009)。洱源温泉位于洱源地热区内,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(杨惠,2015)。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(姚永仲,2010)。

## 2 水文地球化学特征分析

### 2.1 野外采样和处理方法

利用沉淀法获取 3 个温泉水中溶解碳的  $\delta^{13}\text{C}$  值,具体步骤为:取 50 mL 温泉水样,加入过量饱和  $\text{Ba}(\text{OH})_2$  溶液,将  $\text{BaCO}_3$  沉淀洗净过滤、烘干,送中科院地球化学研究所环境地球化学实验室测试  $\text{BaCO}_3$  沉淀的  $\delta^{13}\text{C}$  值,使用仪器为 Thermo Fish 生产的 MAT253 同位素质谱仪,精度  $\leq 0.1\text{‰}$ ;用 50 mL 聚乙烯取样瓶清洗干净后取温泉水样,用 Dionex ICS-900 离子色谱仪测试常量元素,分辨率为  $0.2 \text{ nS/cm}$ ;用 MAT253 同位素质谱仪测试氢氧同位素,精度分别为  $(\delta\text{D} \pm 0.5)\text{‰}$  和  $(\delta^{18}\text{O} \pm 0.2)\text{‰}$ 。

### 2.2 常量离子特征

3 个温泉水常量离子组分测试结果(表 1)表明,温泉所含阴离子均以  $\text{HCO}_3^-$  占绝对优势,阳离子均以  $\text{Na}^+$  占绝对优势,且富含  $\text{K}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ ,反映出这 3 个温泉均受火成岩和碳酸盐岩的共同影响。较高的  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  含量可能与大理地区广泛分布的石炭-二叠系海相沉积灰岩溶解有关,较高的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  同该区的喜山期碱性岩浆岩有关。不同的是下关、洱源温泉高  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $324.3 \text{ mg/L}$ )、低  $\text{Cl}^-$ ,说明这两个温泉水与溶蚀了沉积岩中的石膏及其他硫酸盐矿物有关;弥渡温泉低  $\text{SO}_4^{2-}$ 、高  $\text{Cl}^-$  ( $141.8 \text{ mg/L}$ ),说明该泉水与深部岩浆岩关系密切。

Piper 图解和  $\text{Na}-\text{K}-\text{Mg}$  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(胡小静等,2020)。从 Piper 图可见(图 2a),下关温泉、洱源温泉属于  $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4-\text{Na}$  型水,弥渡温泉属于  $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl}-\text{Na}$  型水,从样品的  $\text{Na}-\text{K}-\text{Mg}$  平衡图解(图 2b)可见,洱源温泉水属于部分成熟水,表明该温泉热水循环较深、循环时间长,同围岩水岩作用较充分;下关和弥渡温泉水属未成熟水,属于浅层水区域。

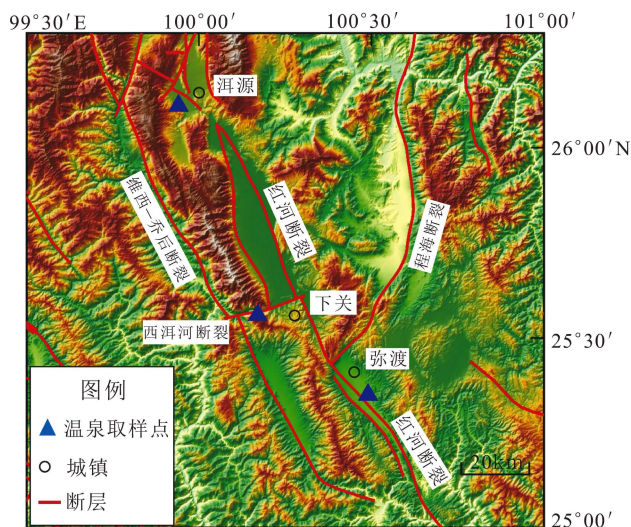


图 1 研究区构造地形图

Fig. 1 Structural topographic map of the study area

表 1 3 个温泉水样化学成分及氢氧同位素组成分析表

Tab. 1 Water chemical composition and hydrogen – oxygen isotope composition of the three springs

温泉名	水温/ (℃)	pH	C <sub>tot</sub> / (mmol · L <sup>-1</sup> )	δ <sup>18</sup> O(‰)	δ <sup>2</sup> H(‰)	主要阴离子/(mg · L <sup>-1</sup> )					主要阳离子/(mg · L <sup>-1</sup> )			
						F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
下关温泉	71.1	6.91	16.31	-13.936	-104.376	9.4	11.4	0	324.3	676.8	342.2	22.6	7.4	74
洱源温泉	53.2	7.11	30.75	-15.26	-112.14	13.8	27	0.2	520.7	1 375.7	848.1	47.4	7.3	41.2
弥渡温泉	42.3	7.43	9.79	-13.64	-93.1	3.7	141.8	0.6	47	463.7	233.9	23.1	15.3	50.3

注：δ<sup>18</sup>O、δ<sup>2</sup>H(‰)分析标准为 SMOW.

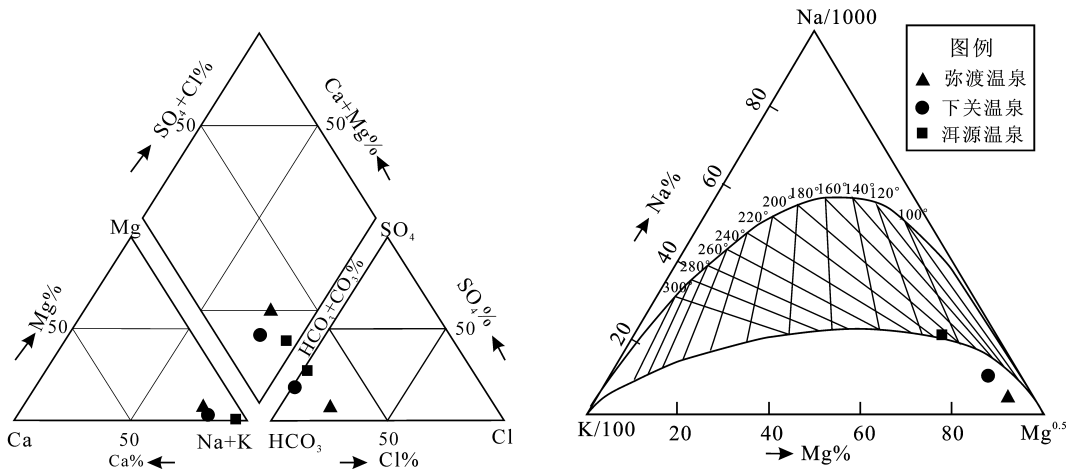


图 2 3 个温泉水的 Piper 图解 (a) 及 Na - K - Mg 图解 (b)

Fig. 2 Piper diagram (a) and the Na - K - Mg ternary diagram (b)

of the water samples from the three hot springs

2.3 氢氧同位素特征

3 个温泉水的氢氧同位素分析结果见表 1。1991 年地矿部水文所得出的西南地区降水线方程为 (姚永仲, 2010):

$$\delta^2\text{H} = 7.96 \delta^{18}\text{O} + 9.52 \quad (1)$$

根据式 (1) 及表 1 数据绘出的 δ<sup>18</sup>O - δ<sup>2</sup>H 关系如图 3 所示。从图 3 可见, 3 个温泉的氢氧同位素数据都落在大气降水线附近, 说明温泉地下水补给来源是大气降水, 并且下关和弥渡温泉与大气降水线略有偏移, 说明温泉热水的补给区到排泄区有一定距离。

2.4 碳同位素特征

温泉水中的 δ<sup>13</sup>C 值获取过程可表述为 (上官志冠, 1987):

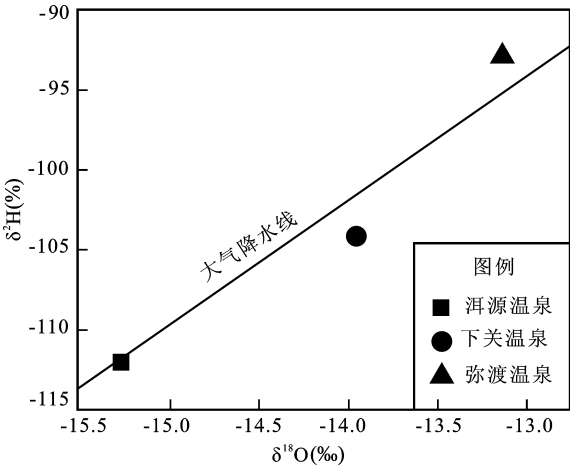
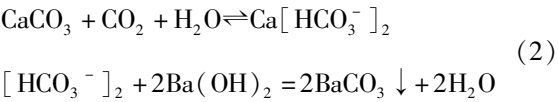


图 3 3 个温泉水 δ<sup>18</sup>O - δ<sup>2</sup>H 图

Fig. 3 δ<sup>18</sup>O - δ<sup>2</sup>H plot of the water samples

from the three hot springs

上述反应的最终产物为 BaCO<sub>3</sub>, 其 δ<sup>13</sup>C 值可认为是温泉溶解碳的 δ<sup>13</sup>C 值 (δ<sup>13</sup>C<sub>tot</sub>), 3 个温泉的 δ<sup>13</sup>C<sub>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></sub> 分析结果及 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量变化见表 2。

表2 温泉水样的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值Tab. 2  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  value of the thermal water samples

采样日期	下关温泉		洱源温泉		弥渡温泉	
	$\delta^{13}\text{C}_{\text{tot}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{HCO}_3^- /$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\delta^{13}\text{C}_{\text{tot}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{HCO}_3^- /$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\delta^{13}\text{C}_{\text{tot}}$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{HCO}_3^- /$ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )
2016-10	-5.262	1 076.3	-4.881	2 117.3	-1.055	726.4
2016-11	-6.915	1 554.4	-6.318	1 118.4	-1.088	705.1
2016-12	-5.611	1 044.7	-4.895	2 577.5	-2.631	499.1
2017-01	-5.203	1 165.5	-5.137	3 048.1	-3.284	708.4
2017-02	-4.998	939.5	-4.596	3 232.1	-4.086	578.4
2017-03	-4.601	907.9	-4.510	4 328.2	-3.601	476.2
2017-04	-5.084	845.3	-4.735	2 023.2	-3.015	427.9
2017-05	-5.105	817.5	-5.012	2 026.9	-3.324	419.2
2017-06	-5.162	997.5	-5.321	2 113.6	-3.642	739.4
2017-07	-4.903	950.0	-4.834	2 229.4	-3.875	777.8
均值	-5.284	1 029.9	-5.024	2 481.5	-2.960	605.8

注： $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  分析标准为 VPDB.

### 3 $\text{CO}_2$ 来源分析

#### 3.1 计算方法

本文参考 Chiodini 等 (1999) 计算意大利非火山区地下水  $\text{CO}_2$  来源的过程和 Lewicki 等 (2013) 计算美国非火山区地下水  $\text{CO}_2$  来源的过程, 根据 3 个温泉的地球化学特征, 运用碳同位素质量平衡方法定量计算温泉水中不同来源  $\text{CO}_2$  的含量。首先, 利用 PHREEQC 软件及温泉样品的各项离子含量, 计算得出温泉水中的总 C 含量  $[\text{C}_{\text{tot}}]$  (表1)。 $[\text{C}_{\text{tot}}]$  是含水层碳酸盐矿物溶解于水的 C 含量  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  与来自于非含水层碳酸盐溶解的 C 含量  $[\text{C}_{\text{ext}}]$  的总和, 即:

$$[\text{C}_{\text{tot}}] = [\text{C}_{\text{carb}}] + [\text{C}_{\text{ext}}] \quad (3)$$

式中:  $[\text{C}_{\text{ext}}]$  包括来自于溶解于大气降水的生物成因碳和地球深部的碳, 如变质成因碳和幔源碳。假设温泉水中的  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  均来自于 Ca、Mg 碳酸盐和硫酸盐的溶解, 并且没有发生  $\text{CO}_2$  脱气作用,  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  可由式 (4) 计算得出:

$$[\text{C}_{\text{carb}}] = [\text{Ca}] + [\text{Mg}] - [\text{SO}_4] \quad (4)$$

利用式 (4) 计算得到的  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  和测试得到的

$[\text{C}_{\text{tot}}]$  可以计算出各个温泉样品中的  $[\text{C}_{\text{ext}}]$ 。式 (3) 的碳同位素质量平衡方程可表述为:

$$[\text{C}_{\text{tot}}] \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{tot}} = [\text{C}_{\text{carb}}] \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}} + [\text{C}_{\text{ext}}] \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{ext}} \quad (5)$$

由式 (5) 整理得到:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}} = \left[ \delta^{13}\text{C}_{\text{tot}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{carb}} \left( [\text{C}_{\text{carb}}] / [\text{C}_{\text{tot}}] \right) \right] \left( [\text{C}_{\text{tot}}] / [\text{C}_{\text{ext}}] \right) \quad (6)$$

根据上官志冠 (1987) 的研究, 大理地区灰岩的  $\delta^{13}\text{C} = 0.5\text{‰}$ , 即该地区  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  值为  $0.5\text{‰}$ 。将表 1 中的  $\text{C}_{\text{tot}}$ 、表 2 中的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{tot}}$ 、式 (4) 计算得到的  $[\text{C}_{\text{carb}}]$ 、式 (1) 计算得到的  $[\text{C}_{\text{ext}}]$  带入式 (6), 计算得出  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}}$ 。利用  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}} - [\text{C}_{\text{ext}}]$  图可以估算出温泉水样中深部碳的混入量及其  $\delta^{13}\text{C}$  值, 进而判断其来源。

#### 3.2 分析结果

用式 (4) 计算  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  时, 得出下关和洱源温泉  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  值为负值, 弥渡温泉  $[\text{C}_{\text{carb}}]$  值为正值, 下关和洱源温泉的  $[\text{C}_{\text{ext}}] > [\text{C}_{\text{tot}}]$ , 说明这两个温泉水在涌出地表前发生了方解石沉淀和  $\text{CO}_2$  脱气作用, 导致  $[\text{C}_{\text{tot}}]$  略微减少, 因此计算出的温泉水溶解碳含量须视为最小估计值 (Chiodini *et al*, 1999)。假设下关和洱源温泉的  $[\text{C}_{\text{ext}}] = [\text{C}_{\text{tot}}]$ , 用表 2 中  $\delta^{13}\text{C}_{\text{tot}}$  的均值计算得到这 3 个温泉的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}}$  值, 并将  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}}$  值和  $[\text{C}_{\text{ext}}]$  投到  $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}} - [\text{C}_{\text{ext}}]$  图中 (图 4)。图 4 中的 3 条理论曲线分别代表在初始溶解碳浓度为  $1 \text{ mmol/L}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  值为  $-17\text{‰}$  的大气渗入水中逐渐加入来自于幔源的  $\text{CO}_2$  (虚线,  $\delta^{13}\text{C} = -6\text{‰}$ ), 上古生界碳酸盐岩的碳 (实线,  $\delta^{13}\text{C} = 3\text{‰}$ , 代表变质成因碳源) 和深部碳 (短划线,  $\delta^{13}\text{C} = -8\text{‰}$ ) 的演化过程。

从图 4 可以看出, 3 个温泉样品均落入地幔碳与碳酸盐岩碳之间, 说明 3 个温泉来自于非碳酸盐岩溶解碳, 主要包含下渗大气降水溶解碳  $[\text{C}_{\text{inf}}]$ 、地幔来源碳和变质成因碳, 即:

$$[\text{C}_{\text{ext}}] = [\text{C}_{\text{inf}}] + [\text{C}_{\text{deep}}] \quad (7)$$

下关和洱源温泉靠近地幔端, 说明其深部碳

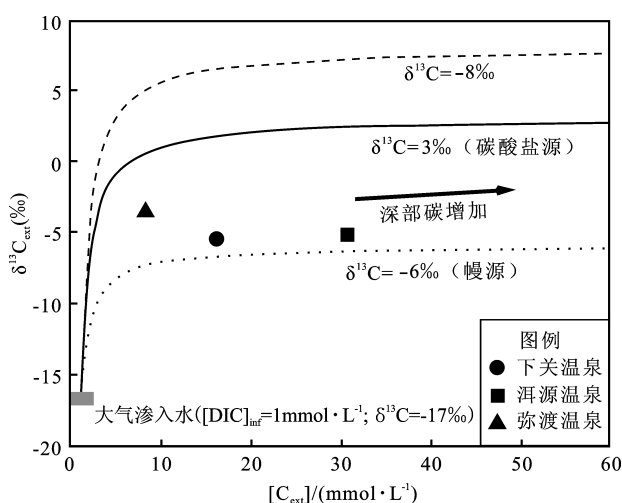


图4 地下水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}}$  -  $[\text{C}_{\text{ext}}]$  理论曲线 (据 Chiodini *et al.*, 1999; Lewicki *et al.*, 2013)

Fig. 4 Diagram of  $\delta^{13}\text{C}$  of external DIC ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{ext}}$ ) versus external DIC concentration ( $[\text{C}_{\text{ext}}]$ ) for groundwater samples (based on Chiodini *et al.*, 1999, Lewicki *et al.*, 2013)

以地幔来源碳为主；弥渡温泉介于地幔来源碳和变质成因碳之间。假设下渗大气降水溶解碳  $[\text{C}_{\text{inf}}]$  值为一常量，如图4中的1 mmol/L，可以计算出  $[\text{C}_{\text{deep}}]$ 。由  $[\text{C}_{\text{carb}}]$ 、 $[\text{C}_{\text{deep}}]$  及  $[\text{C}_{\text{tot}}]$  计算得到下关温泉大约6%的碳来自下渗大气降水中的生物成因碳，13%的碳来自于含水层碳酸盐矿物溶解产生的碳，其余81%来自于深部成因的碳。洱源温泉大约3%的碳来自下渗大气降水中的生物成因碳，4%的碳来自于碳酸盐矿物溶解产生的碳，其余93%来自于深部成因的碳。弥渡温泉大约10%的碳来自下渗大气降水中的生物成因碳，14%的碳来自于碳酸盐矿物溶解产生的碳，

其余75%来自于深部成因的碳。需要说明的是，下关和洱源温泉地下水在流出地表之前可能发生了碳酸盐沉积和脱CO<sub>2</sub>作用，会使  $[\text{C}_{\text{tot}}]$  偏低， $[\text{C}_{\text{carb}}]$  减少。这样导致下关温泉来自碳酸盐岩溶解的碳偏低，深部来源的碳偏高。但3个温泉CO<sub>2</sub>来源均以地幔来源和变质成因混合的深部来源CO<sub>2</sub>为主，生物成因和碳酸盐矿物溶解产生的CO<sub>2</sub>相对较少。

#### 4 温泉CO<sub>2</sub>释放与地震的关系

利用表2的数据绘制了3个温泉的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值、 $\text{HCO}_3^-$ 浓度随时间变化的关系图(图5)。Chiodini等(Chiodini *et al.*, 1999)在研究意大利非火山区地下水时发现，随地下水中碳含量增加，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值出现由“轻”向“重”的变化趋势，这可能是由于温泉水中CO<sub>2</sub>来源以 $\delta^{13}\text{C}$ 值相对较高的深部碳为主，深部碳越多，表现出的 $\delta^{13}\text{C}$ 值越高。在本文研究中，大理地区温泉的 $\text{HCO}_3^-$ 浓度与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值变化似乎也具有一定的同步性，3个温泉均不同程度呈现出Chiodini等(1999)描述的变化特点。

2017年3月27日漾濞发生 $M_s 5.1$ 地震，震中距离3个温泉均小于100 km。漾濞 $M_s 5.1$ 地震发生前，3个温泉的 $\text{HCO}_3^-$ 浓度与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 在局部打破了正相关关系，如2016年11月至震前1个月下关温泉 $\delta^{13}\text{C}$ 值上升；2016年12月至2017年1月洱源温泉 $\delta^{13}\text{C}$ 值下降；自2017年2月开始弥渡温泉 $\delta^{13}\text{C}$ 值上升。 $\text{HCO}_3^-$ 浓度与 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 相关关系的打破可能暗示地震前区域应力的变化，

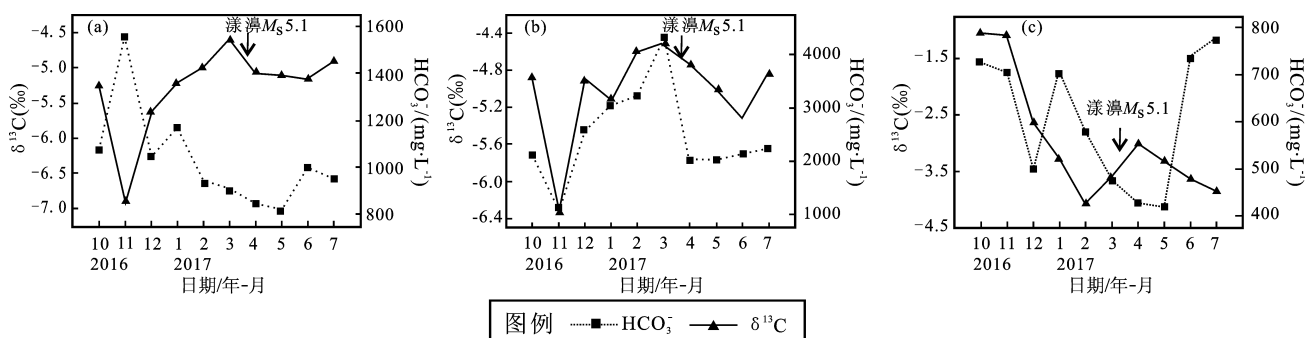


图5 下关(a)，洱源(b)及弥渡(c)温泉水 $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$ 值、 $\text{HCO}_3^-$ 含量变化与漾濞地震关系图

Fig. 5 Relation between the Yangbi earthquake and the variation of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  value and  $\text{HCO}_3^-$  value of the thermal water in the three hot springs: Xiaoguan (a), Eryuan (b), and Midu (c)

区域应力变化不仅可以影响不同来源  $\text{CO}_2$  的产生,也影响破裂带渗透率变化,进而影响不同来源  $\text{CO}_2$  的扩散运移。

## 5 结论

本文通过研究大理地区下关、洱源、弥渡 3 个温泉的常量元素地球化学特征、氢氧同位素地球化学特征和碳同位素地球化学特征,得出以下主要结论:

(1) 温泉水的常量离子分析表明 3 个温泉均属于  $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$  型水,氢氧同位素在大气降水线附近,说明 3 个温泉水的补给源主要为大气降水,经过下渗循环,携带了深部物质与热量沿断裂上升出露。

(2) 下关温泉的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  值为  $-6.915\text{‰} \sim -4.162\text{‰}$  (均值为  $-5.044\text{‰}$ ),洱源温泉的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  值为  $-6.318\text{‰} \sim -4.510\text{‰}$  (均值为  $-5.024\text{‰}$ ),弥渡温泉的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  值为  $-4.086\text{‰} \sim -1.055\text{‰}$  (均值为  $-2.960\text{‰}$ );  $\text{CO}_2$  的来源分析表明,下关、洱源和弥渡温泉的  $\text{CO}_2$  主要为深部成因,既有变质成因的碳,也有地幔成因的碳。

(3) 2017 年漾濞  $M_{\text{s}}5.1$  地震前,3 个温泉的  $\text{HCO}_3^-$  浓度与  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  在局部打破了正相关关系,可能暗示地震前区域应力的变化。但在本次取样时间段本区域内仅发生过 1 次漾濞  $M_{\text{s}}5.1$  地震,该区  $\text{CO}_2$  释放与地震活动的关系还需进一步研究。

## 参考文献:

- 戴金星,戴春森,宋岩. 1994. 中国一些地区温泉中天然气的地球化学特征及碳、氢同位素组成[J]. 中国科学:化学,24(4): 426-433.
- 胡小静,付虹,张翔,等. 2020. 昭通地区流体观测井地下水地球化学特征[J]. 地震研究,43(4):630-637.
- 李其林,王云,赵慈平,等. 2019. 云南省香格里拉市下给和天生桥温泉水化学和逸出气  $\text{CO}_2$  释放特征变化[J]. 地震研究,42(3): 320-329.
- 苗慧师. 2009. 云南省下关温泉和安宁温泉的特征及成因研究[D]. 北京:中国地质大学,16-17.
- 上官志冠,刘桂芬,高松升. 1993. 中国一些地区温泉中天然气川滇

- 块体边界断裂的  $\text{CO}_2$  释放及其来源[J]. 中国地震,9(2): 146-153.
- 上官志冠. 1987. 滇西实验场区温泉碳同位素地震地球化学特征[J]. 地震,6(6):25-34.
- 沈立成,袁道先,梯平. 2007. 中国西南地区  $\text{CO}_2$  释放点的 He 同位素分布不均一性及大地构造成因[J]. 地质学报,81(4): 475-487.
- 向宏发,韩竹军,魏顺民. 2004. 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,26(4):597-610.
- 颜聘,李如陶,李四海. 1997. 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,21(2):129-136.
- 杨惠. 2015. 云南省洱源县高氟温泉水中氟的来源及其推周边环境影响分析[D]. 昆明:云南师范大学,21-23.
- 姚永仲. 2010. 弥渡温泉地质特及成因模式分析[D]. 昆明:昆明理工大学.
- 曾普胜,莫宣学,喻学惠. 2002. 滇西富碱斑岩带的 Nd, Sr, Pb 同位素特征及其挤压走滑背景[J]. 岩石矿物学杂志,21(3): 231-241.
- 张启明. 2001. 云南大理地区温泉  $\text{CO}_2$  释放与地震预报研究[J]. 地震研究,24(3):238-244.
- 周晓成,孙凤霞,陈志. 2016. 汶川  $M_{\text{s}}8.0$  地震破裂带  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、Rn 和 Hg 脱气强度[J]. 岩石学报,33(1):291-303.
- Chiodini G, Frondini F, Kerrick D M, et al. 1999. Quantification of deep  $\text{CO}_2$  fluxes from Central Italy: Examples of carbon balance for regional aquifers and of soil diffuse degassing[J]. Chemical Geology, 159: 205-222.
- Girault F, Adhikari L B, France - Lanord C, et al. 2018. Persistent  $\text{CO}_2$  emissions and hydrothermal unrest following the 2015 earthquake in Nepal[J]. Nat Commun, 9(1):1-10.
- Irwin W P, Barnes I. 1980. Tectonic relations of carbon dioxide discharges and earthquakes[J]. Journal of Geophysical Research, 85(6): 3115-3121.
- Lewicki J L, Hilley G E, Dobeck L, et al. 2013. Geologic  $\text{CO}_2$  input into groundwater and the atmosphere, Soda Springs, ID, USA[J]. Chemical Geology, 339:61-70.
- Miller S A, Collettini C, Chiaraluce L, et al. 2004. Aftershocks driven by a high-pressure  $\text{CO}_2$  source at depth[J]. Nature, 427(19): 724-727.
- Miller S A. 2013. The role of fluids in tectonic and earthquake processes[J]. Advances in Geophysics, 54:1-46.
- Weinlich F H. 2014. Carbon dioxide controlled earthquake distribution pattern in the NW Bohemian swarm earthquake region, western Eger Rift, Czech Republic - gas migration in the crystalline basement[J]. Geofluids, 14:143-159.

## Characteristics of the Carbon Isotope of the Dissolved CO<sub>2</sub> in Hot Springs in Dali Region, West Yunnan Province

ZHANG Xiang, FU Hong, LUO Ruijie, LI Bo, ZI Chengzhu  
(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Finding the source of the dissolved CO<sub>2</sub> in hot springs in the study area will facilitate judging and assessing the anomalous information about the dissolved CO<sub>2</sub>. From October 2016 to July 2017, 10 repeated sampling observations were made on hydrochemical ions and  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  in three hot springs: Xiaguan, Eryuan and Midu in Dali region, West Yunnan Province. The results showed that the three hot springs' water belonged to HCO<sub>3</sub> · SO<sub>4</sub> – Na type. The analysis of Hydrogen-oxygen isotope indicated that the groundwater recharge of the three hot springs was derived from atmospheric precipitation. The analysis of carbon isotope showed that the CO<sub>2</sub> in the three hot springs was mainly derived from the deep mantle and metamorphism. Before the Yangbi 5.1-magnitude earthquake in 2007, which was located within 100 km from these three hot springs, the positive correlation between the background values of  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  and HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> in the three hot springs were observed broken, which indicated that the  $\delta^{13}\text{C}_{\text{HCO}_3^-}$  value had a certain correlation with the Yangbi earthquake.

**Keywords:** hot spring; hydrochemical ions; CO<sub>2</sub> and carbon isotope; earthquake; Dali region