

滇东地区温泉流体地球化学特征及构造意义

周锐¹, 周晓成^{1*}, 何苗¹, 天娇¹, 张永仙¹, 董金元¹, 李静超¹, 赵秋月²

1. 中国地震局地震预测研究所, 北京 100036; 2. 泰山学院 旅游学院, 山东 泰安 271000

摘要: 为了评估弥勒—富源断裂带不同段落的地震风险, 明确未来滇东地区地震重点监测区域, 探讨温泉流体地球化学特征及其形成原因, 对2016—2020年期间, 在滇东地区采集的6个温泉水化样品和3个气体样品进行主量元素、微量元素、氢氧同位素、二氧化硅浓度和锶同位素含量的测试分析, 结果表明: 弥勒—富源断裂带温泉水的补给来源以大气降水为主, 温泉的补给高程约为2167~2383 m。通过SiO₂温标计算得到的弥勒—富源断裂带温泉水循环深度为552~828 m, 硅焓模型计算的结果为929~1089 m, 与川滇菱形块体东边界断裂带上的温泉相比, 循环深度相对较浅。弥勒—富源断裂带温泉气体主要为壳源, 受幔源成分影响较小。断裂带的南端弥勒地区地震相对频繁, 中小地震较多, 与地下水作用造成岩石弱化, 断裂强度相对较小有关。

关键词: 弥勒—富源断裂带; 流体地球化学; 温泉; 地震

中图分类号: P315.7 doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240137

Fluid geochemical characteristics and tectonic significance of hot springs in eastern Yunnan

ZHOU Rui¹, ZHOU Xiao-cheng^{1*}, HE Miao¹, TIAN Jiao¹, ZHANG Yong-xian¹, DONG Jin-yuan¹,
LI Jing-chao¹, ZHAO Qiu-yue²

1. Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China;

2. Tourism College, Taishan University, Tai'an, Shandong 271000, China

Abstract: In order to evaluate the seismic risk of different sections of the Mile-Fuyuan fault zone, to clarify the key monitoring area for future earthquake in eastern Yunnan, and to explore the geochemical characteristics of hot springs and their genesis, the geochemical characteristics of major and trace elements, hydrogen, oxygen and strontium isotopes, and silica concentration of six hot spring water samples and three gas samples collected in eastern Yunnan from 2016 to 2020 were studied. The results show that: 1) the recharge source of hot spring water in the Mile-Fuyuan fault zone is mainly atmospheric precipitation, and the recharge elevation of the hot springs is about 2167~2383 m; 2) the hot spring circulation depths in the Mile-Fuyuan fault zone calculated by the SiO₂ geothermometer and the silicon-enthalpy model are 552~828 m and 929~1089 m, respectively, which are shallower than the hot spring circulation depths on the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan Block; 3) the hot spring gases in the Mile-Fuyuan fault zone are mainly of crustal origin and are less affected by mantle sources; 4) small and moderate earthquakes are relatively frequent in the Mile area at the southern end of the Mile-Fuyuan fault zone, which may be related to the smaller fracture strength there and the weakening of the rocks caused by groundwater.

收稿编号: 2024-0146, 2024-8-6 收到, 2024-10-11 改回

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8224095); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(CEAIEF2022030200, CEAIEF2022030205, CEAIEF20220507, CEAIEF20220213); 国家重点研发计划项目(2018YFE0109700, 2019YFC150920); 国家自然科学基金资助项目(41673106, 42073063, 4193000170, U2039207); IGC项目724

第一作者简介: 周锐(1986—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 流体地球化学。E-mail: cnuarui@sina.com.

*通信作者简介: 周晓成(1978—), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 地震地球化学。E-mail: zhouxiaocheng188@163.com.

引用此文:

周锐, 周晓成, 何苗, 天娇, 张永仙, 董金元, 李静超, 赵秋月. 2024. 滇东地区温泉流体地球化学特征及构造意义. 矿物岩石地球化学通报,

doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240137

Zhou R, Zhou X C, He M, Tian J, Zhang Y X, Dong J Y, Li J C, Zhao Q Y. 2024. Fluid geochemical characteristics and tectonic significance of hot springs in eastern Yunnan. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, doi: 10.3724/j.issn.1007-2802.20240137

Key words: the Mile-Fuyuan fault zone; fluid geochemistry; hot spring; earthquake

0 引言

滇东地区位于扬子板块西南缘,上扬子古陆与华南陆块拼合部位,毗邻滇西特提斯构造带,处于特提斯构造带与华南构造交接的枢纽位置(董云鹏等,2002;石显耀等,2009;陶志刚等,2011)。新生代以来,印度板块与欧亚板块发生碰撞,青藏高原地壳缩短增厚、高原隆升,高原物质东向挤出(Molnar et al.,1993;Tapponnier et al.,2001;Peng et al.,2022),相应地,青藏高原东端的构造活动对扬子克拉通及其内部的昭通—曲靖等深断裂产生有重要影响(曾普胜等,2015)。云南中低温热水活动区,主要分布于滇东断陷盆地,滇东地区发育的深大断裂,对温泉的形成和分布具有明显的控制作用(殷瑛等,2006;张贵等,2021)。同时,滇东是煤层气资源(coalbed methane, CBM)丰富的地区(Li et al.,2020)。热流体的形成可能对煤层气的富集成藏产生了重要影响。热流体作用不仅可以促进煤层气的生成,还可以直接或间接控制煤储层的储集能力和煤层气的聚散特征及能量系统的动态平衡(Tang et al.,2016;唐淑玲等,2016)。

小江断裂是川滇菱形块体与滇东块体的边界,是川滇菱形块体东边界的重要组成部分(林向东等,2010)。川滇菱形块体受印度板块与欧亚板块的碰撞作用以及印度板块NNE向运动的影响,受华南地块的阻挡,造成川滇菱形块体的SE-SSE向移动和顺时针转动,其东边界表现为强烈的左旋走滑运动(Xu et al.,2003)。川滇菱形块体东边界由鲜水河断裂带、安宁河断裂带、则木河断裂带、小江断裂带组成,动力作用和地壳运动变形非常强烈。鲜水河断裂带、安宁河断裂带及小江断裂带均具有闭锁程度和左旋滑动亏损速率较高,强震危险性较高的段落,如小江断裂带巧家—东川段、宜良—建水段(刘辛中等,2022)。小江断裂东侧的滇东地区同样具有中强地震的发震背景,且强震前直接前震较少,难于预测预报(杨继登,1985)。在关注川滇菱形块体东边界的同时,也应该关注晚第四纪活动迹象不明显,但仍有潜在发震危险性的区域性大断裂,如弥勒—师宗断裂带。历史上滇东的弥勒—师宗断裂带曾发生11次5级以上地震(常祖峰等,2019)。

温泉作为深循环地下水的天然露头,大多沿断裂带出露,其化学与同位素组成是水文地质环境的信息载体,携带大量来自地壳深部的地球化学信息,指示着

流体补给来源、循环路径和储层性质的变化,具有循环深度深、流速速度快、受人为影响小等特征,可以更真实地反映地震孕育发生过程中水文地质条件的变化情况(Klemperer et al.,2022;天娇等,2024)。此外,断裂带的温泉还存在深部气体上涌现象(Zhou et al.,2017;周晓成等,2020)。断裂带附近的温泉水的水化学离子(Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Mg^{2+} 、TDS(total dissolved solid)等)、温泉气体(H_2 、He、Rn、 CO_2 等)的浓度及温泉气体中稳定同位素的比值($^3\text{He}/^4\text{He}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)、温泉水同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)与区域内的地震活动密切相关,在很多地震前后能够观测到明显的异常变化(李营等,2023)。因此,监测断裂带附近温泉能够提供固体地球内部的信息,对于认识区域性大断裂的发震风险具有重要的意义(崔月菊等,2022),如小江断裂带(王云等,2014)、红河断裂带(邵维晔等,2022)、滇东南楔形构造区(王云等,2018a)的温泉流体地球化学因其地震危险性较高而受到关注。活断层不同段落地震活动性差异与水对各段落的弱化程度有关,强震孕育于温泉水循环深度较深的地区的两端(林元武,1993)。最近,陶兰初等(2023)研究了滇东地区弥勒—师宗断裂带北段老厂地区温泉和地热钻孔水的流体地球化学特征,结果表明地热水水化学类型为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型,反映深循环的 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}$ 型地热水,与矿体发生阳离子交换作用,在这一过程中 Na^+ 进入地热水中,形成 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型地热水,地热水补给高程为1984.9~2283.9 m,热储温度为87.5~135.7℃,循环深度为1538.0~2502.0 m。弥勒—富源断裂带南端弥勒地区地震活动相对频繁,中小震较多;北端中小震较南端少,但仍有一定数量;中段地震极少且为小震。该断裂具有一定的潜在发震危险性,但沿线温泉的流体地球化学特征研究较少,有必要对滇东地区温泉流体地球化学特征进行研究,通过流体地球化学特征分析弥勒—富源断裂带不同段落的地震风险。

为了评估弥勒—富源断裂带不同段落的地震风险,明确未来滇东地区地震重点监测区域,探讨温泉流体地球化学特征及其形成原因,采集滇东地区6个温泉水化样品和3个温泉的气体样品,进行主量元素、微量元素、氢氧同位素、二氧化硅浓度和锶同位素含量的测试分析,研究了滇东地区,特别是弥勒—富源断裂带的温泉流体地球化学特征,估算了热储温度和循环深度,分析温泉气体来源,探索其流体地球化学特征与断裂

带地震活动性的关系。

1 区域概况

滇东地区属于高原季风气候区,大部分地区平均气温 $15\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$,区内降水丰富,年降水量 $800\sim 1300\text{ mm}$ 。区域内分布有金沙江、南盘江、元江等河流。其中,南盘江上游位于滇东地区,流域北侧为乌蒙山,是南盘江和金沙江、北盘江的分水岭,西面和南面为哀牢山和六韶山,是南盘江和红河、郁江的分水岭。流域内石灰岩分布广泛,是典型喀斯特岩溶地区。流域水系发达,主要支流为曲江、泸江、甸溪河、清水河、黄泥河、马别河(汤飞和毛忠华,2004)。甸溪河属于南盘江一级支流,发源于曲靖市师宗县雄壁镇沙石坡,向西南方向流经红河州泸西县金马镇城称金马河,经过天生洞、大黑山约 5 km 伏流,入弥勒市称禹门河,白马河、花口河在弥勒城区附近汇合后称甸溪河,由北向南流至弥勒县朋普镇锁龙寺后,转向东南入峡谷,在腻脚江村附近汇入南盘江(杨琼波和保国华,2014)。

区内地层自元古界至第四系均有出露,深大断裂以近南北向、北东向为主(张贵等,2021)。新元古界地层,滇东地区牛头山组出露(吴志亮和梁永宁,2002)。震旦系下部为碎屑岩,上部为碳酸盐岩,滇东出露广泛。下古生界以碎屑岩为主夹碳酸盐岩,上古生界大部分地区下-中泥盆统以碎屑岩为主,上泥盆统-二叠系乌拉尔统主要为碳酸盐岩,二叠系乐平统玄武岩在区内出露,下三叠统、上三叠统以砂泥岩为主,中三叠统为灰岩、白云岩,侏罗系、白垩系为红色砂泥岩,新生界地层主要分布在盆谷地中,为砂砾石、黏土、黏土岩等(张贵等,2021)。

区内采样泉点主要沿着弥勒—富源断裂带和曲靖断裂带分布。弥勒—富源断裂带,为滇东台褶带与滇东南褶皱带的边界断裂,总体走向NE,由弥勒—富源断裂与弥勒—师宗断裂两条主干断裂与其间发育的若干NE或NNE走向次级断裂组成,东北起自贵州盘县西北土城,经陆良、石林和弥勒,在南盘江边被小江断裂切错而终止,走向 30° ,全长约 300 km ,控制着富源、陆良、弥勒、虹溪、朋普等盆地的形成,断裂带沿线挤压强烈,小断层褶皱发育,具有较强的左旋压扭性。其中,弥勒—富源断裂北起贵州盘县西北土城,经富源、独木水库、马街至弥勒西南斜交于小江东支断裂带上,长约 300 km 。燕山期以前主要表现为左旋张性扭动的运动特征,新生代以来表现为右旋压性扭动的活动特征。弥勒—师宗断裂北起师宗盆地北缘,在弥勒县城东南进入弥勒盆地,在弥勒盆地南交于小江断裂(安晓文等,2018)。弥勒—师宗断裂带呈现左旋走滑运动特

征,活动性不太强,左旋走滑速率为 1.84 mm/a ,呈压性(王伶俐等,2016)。曲靖断裂带主要由磨戛—堡子上断裂和热水塘—沾益断裂组成。磨戛—堡子上断裂北起磨脚以北的偏桥水库,向南进入曲靖盆地,向南在松林冲附近出露,经后所头、三岔河东侧、白岩冲东侧,至水井子交于弥勒—富源断裂,属早—中更新世断裂。热水塘—沾益断裂于贺家梁子北交于明德—雪麻箐断裂,向南经热水塘、卡朗、菠卡、谭家营,进入沾益盆地,于三宝东侧复现交于青峰—大龙潭断裂,属晚更新世活动断裂(安晓文等,2018)。滇东地区温泉属于丽江—楚雄—绥江—文山温泉区的师宗—弥勒带,该带南起开远朋普,沿着弥勒—师宗断裂带向NE方向延伸至法本一带,水温一般 $30\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 型为主。历史地震常发生在温泉较多的弥勒附近,且以中小地震为主,有频度高、强度低的特点(覃玉玺和潘用泛,1982)。

研究区位于滇东稳定抬升区,滇东稳定抬升区的西界为小江东支断裂,南界为南盘江断裂,新构造运动以大面积稳定抬升为主要特征,断块间差异运动幅度较小,是云南高原面保存最完整的地区。高原面高程多为 $2000\sim 2200\text{ m}$ 。断裂构造以北东向为主,晚更新世以来构造活动较弱,多为5.5级左右的中强地震,且地震的成带性明显(安晓文等,2018)。

2 样品采集和测量方法

2016—2020年,对滇东地区开展了三次野外调查和采样,采集6个温泉的水化样品,并同时采集其中D03、D05、D06三个温泉的气体样品(图1和表1)。采集的水化样品进行了主量元素、微量元素、氢氧同位素、二氧化硅浓度和锶同位素含量测试分析。采样采用 250 mL 聚乙烯塑料瓶,为避免水样受到污染,取样前使用温泉水润洗2~3次,排净瓶内空气。现场测定温泉水温度、pH值、电导率,水温采用数字温度计进行现场测量,误差为 $\pm 1\%$ 。对于测定微量元素的瓶内滴入 1.0 mL 浓硝酸,室温下保存。

常量元素的测定在中国地震局地震预测重点实验室利用离子色谱仪完成,测试仪器为Dionex ICS-900离子色谱仪和AS40自动进样器,检出限为 0.01 mg/L ,测量偏差在2.0%以内(张炜斌等,2013;冉华等,2009;Chen et al.,2015);采用ZDJ-3D型电位滴定仪通过标准滴定程序测定温泉水中 HCO_3^- 和 CO_3^{2-} 浓度,滴定所用盐酸浓度为 0.05 mol/L ,测量偏差在2.0%以内。根据下式计算离子平衡(ib),结果见表2,结果表明,阴阳离子的测量误差均小于5%(石宏宇等,2022)。

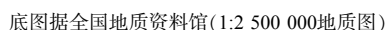


图1 滇东地区温泉采样点分布

Fig. 1 Distribution of hot spring sampling sites in eastern Yunnan

表 1 滇东地区温泉采样点信息

Table 1 Information of hot spring sampling sites in eastern Yunnan

温泉编号	采样点	北纬/(°)	东经/(°)	高程/m	位置
D01	盛水湾温泉	25.4365	103.5690	2031	马龙区
D02	麒麟温泉	25.3924	103.8459	1873	麒麟区
D03	爨龙园温泉	24.9287	103.6772	1867	陆良县
D04	葵山温泉	24.7786	103.8246	1854	师宗县
D05	红河谷温泉	24.4861	103.5009	1557	弥勒市
D06	小寨村温泉	23.9784	103.3319	1163	弥勒市

$$ib = \frac{\sum \text{阳离子} - \sum \text{阴离子}}{(\sum \text{阳离子} + \sum \text{阴离子}) \times 0.5} \times 100\% \quad (1)$$

由核工业北京地质研究院分析测试中心采用Element型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成样品的微量元素分析,分析精度优于5%(张彦辉等,2018; 欧阳澍培等,2023)。氢氧同位素采用气体同位素质谱仪MAT253测定,以平均海洋水(SMOW)作为标准值,分别记为 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 。氢氧同位素标准物质为国家标准物质(GBW04401、04402)。样品分析精度为 $\delta^2\text{H} < 1\%$, $\delta^{18}\text{O} < 0.2\%$ (刘汉彬等,2013)。二氧化硅浓度采用电感耦合等离子体发射光谱仪Optima-5300DV

测定, 锶同位素使用Phoenix型热电离质谱仪分析(汤书婷等, 2015)。

温泉气体样品采用500 mL玻璃瓶利用排水取气法野外现场采集。温泉气样品的 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 O_2 、 CH_4 和Ar组分使用Agilent 3000气相色谱仪进行实验室测量,测量精度估计如下:其含量1%~100%时相对标准偏差 $<0.5\%$,含量0.01%~1%时相对标准偏差 $<1\%$,含量0.001%~0.01%时相对标准偏差 $<2\%$,而含量0.0001%~0.001%时相对标准偏差 $<5\%$ 。碳同位素分析使用Delta Plus XL质谱计分析完成, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的精度为0.2%(李中平等,2007)。温泉气样品中He、Ne同

位素由中国科学院西北生态环境资源研究院油气资源研究中心完成分析测试, 温泉气He、Ne和Ar的浓度以及同位素使用Noblesse稀有气体同位素质谱仪进行分析(周晓成等, 2020)。

3 测量结果

温泉水样的主量元素和微量元素分析结果见表2和表3。滇东地区温泉水的温度为36.8~61.3℃, 属于中低温温泉。温泉水的溶解性总固体(total dissolved solid, TDS)为130.24~403.41 mg/L, 盛水湾温泉(D01)、麒麟温泉(D02)、爨龙园温泉(D03)、葵山温泉(D04)、红河谷温泉(D05)、小寨村温泉(D06)均属于淡水。温泉水pH值为7.09~7.76, 平均值为7.50, 电导率范围为234~708 μS/cm。

温泉气体样品分析结果如表4所示, 其中滇东地区温泉均以N₂为气体主要组成成分, 温泉气中N₂浓度为87.61%~95.34%, He浓度为35.5×10⁻⁶~6104.0×10⁻⁶,

H₂的浓度为1×10⁻⁶~11×10⁻⁶, CO₂浓度为2.87%~7.89%, CH₄浓度为0%~7.04%, ³He/⁴He(R_{观测}/R_a)值为0.01~0.20, δ¹³C_{CO₂}(PDB)值为-18.2‰~-7.4‰, D03温泉的δ¹³C_{CH₄}(PDB)值-51.2‰(表4)。

4 讨论

4.1 水化学成分特征

温泉水的主要离子为K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、Cl⁻、SO₄²⁻。滇东地区温泉划分为4种水化学类型: HCO₃-Ca·Mg型、HCO₃-Ca型、HCO₃-Mg·Ca型和HCO₃-Na·Ca型。D01温泉水化类型为HCO₃-Mg·Ca型, D02、D04、D06温泉的水化类型为HCO₃-Ca·Mg型, D03温泉水化类型为HCO₃-Na·Ca型, D05温泉水化类型为HCO₃-Ca型。温泉水样的Piper三线图如图2所示。滇东地区温泉的阴离子均以HCO₃⁻为主, D05温泉阳离子以Ca²⁺为主, D03温泉以Na⁺、Ca²⁺为主, 其他温泉阳离子以Ca²⁺、Mg²⁺为主。2016年和2017年两次

表 2 滇东地区温泉水样主量元素分析结果

Table 2 The analytical result of major elements of hot spring water samples in eastern Yunnan

样品 编号	采样 日期	温度 /℃	pH	电导率/ (μS·cm ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Cl/ (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ / (mg·L ⁻¹)	CO ₃ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	ib/%
D01	2020-08-22	45.5	7.76	234	1.79	1.23	15.26	25.39	2.92	5.15	156.86	0	-1.04
D02	2020-08-22	40.5	7.75	344	7.89	1.05	20.02	36.01	4.66	20.25	178.01	0	2.41
D03	2020-08-23	40.5	7.55	708	93.84	2.73	16.38	40.19	29.24	0	419.50	0	-0.69
D04	2020-08-23	41.0	7.52	544	1.97	1.32	27.26	69.60	3.54	45.72	269.94	0	0.92
D05-1	2016-01-19	60.8	7.72	357	8.69	5.09	4.25	73.88	1.61	13.18	251.59	0	0.61
D05-2	2017-02-15	61.3	7.13	388	9.22	4.88	4.54	74.46	1.55	13.27	233.26	0	2.12
D06	2017-02-15	36.8	7.09	668	2.75	1.30	35.77	109.25	0.51	46.52	406.69	0	2.42

表 3 滇东地区温泉水样微量元素分析结果

Table 3 The analytical result of trace elements of hot spring water samples in eastern Yunnan (μg/L)

样品 编号	Li	Be	Ba	B	Sr	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Mo	Cd	Sb	Tl	Pb	Th	U	Ag	Sn	Al
D03	131.0	0.087	209.0	1519.0	359	1.97	2.13	3.28	1.31	20.3	0.164	2.89	3.390	2.98	0.072	0.012	0.021	0.012	0.089	<0.002	0.058	0.002	0.217	1.120
D05-2	16.0	0.064	21.3	111.0	298	2.71	2.35	2.61	1.120	175.0	0.139	2.40	0.472	7.66	0.377	0.015	22.900	0.441	0.560	0.002	0.321	0.002	0.016	18.70
D06	5.5	0.069	45.2	17.90	1420	1.05	4.27	2.13	0.284	197.0	0.184	2.97	1.270	3.53	2.070	0.011	0.055	0.077	0.463	<0.002	2.470	0.004	0.067	5.96

表 4 滇东地区温泉气体化学组分、氦和碳同位素结果

Table 4 The result of chemical compositions, helium and carbon isotopes in hot spring gas samples in eastern Yunnan

样品 编号	He/ (×10 ⁻⁶)	H ₂ / (×10 ⁻⁶)	CO ₂ /%	CH ₄ /%	N ₂ /%	O ₂ /%	Ar/%	R _{测量} /R _a	R _c 改正/R _a	⁴ He/ ²⁰ Ne	He _{幔源} /%	δ ¹³ C _{CO₂} (PDB) /‰	δ ¹³ C _{CH₄} (PDB) /‰	CO ₂ / ³ He (×10 ⁹)
D03	6104.0	11	2.8729	7.0413	87.6110	0.0516	0.7600	0.01	0.010	981.0	0.12	-16.2	-51.2	0.23
D05-1	406.2	1	7.8909	0.0023	89.0206	0.7870	1.3162	0.03	0.009	14.2	0	-7.4	—	4.54
D05-2	421.1	3	3.4713	0	95.1468	0.4599	0.4223	0.03	0.018	25.6	0	-10.0	—	1.90
D06	35.5	2	3.5583	0	95.3438	0.0063	0.4533	0.20	0.028	1.8	0.10	-18.2	—	3.62

注“—”表示无数据

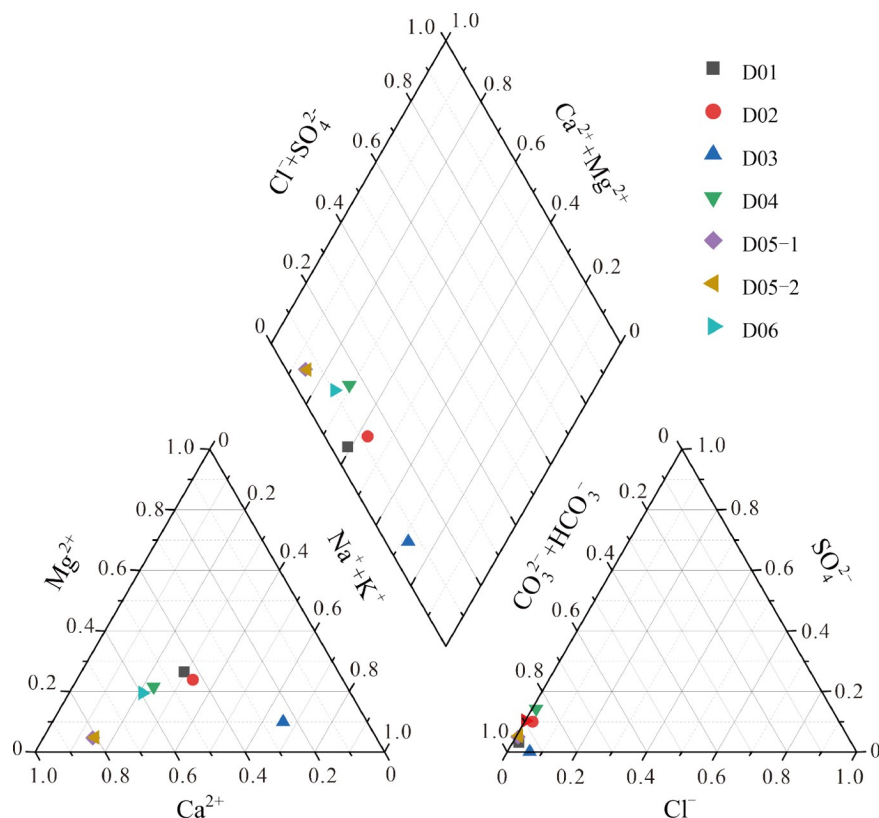


图2 滇东地区温泉水样Piper三线图

Fig. 2 Piper diagram of hot spring samples in eastern Yunnan

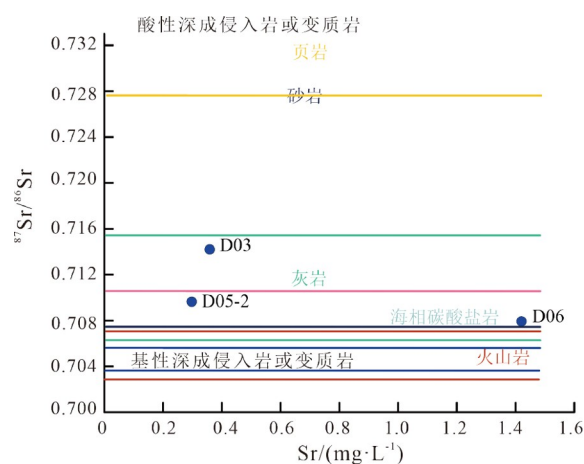
D05温泉采集的温泉水样水化组分中,主量元素组分浓度接近。

对于断裂型温泉而言,水化学成分主要来源于地下水对断裂带两盘岩石的溶解,因此水化学成分主要与断裂两侧围岩的岩性密切相关(杜毓超等,2012)。滇东地区喀斯特地貌发育, HCO_3^- 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 主要来自石灰岩、白云岩等碳酸盐岩类的溶解。

滇东地区温泉微量元素以Li、B、Ba、Sr、Fe、Zn为主,D03温泉的B、Li、Cl浓度较高,说明其经历了相对较深的循环,其较多 Na^+ 可能与地下热水上升过程发生了一定的阳离子交换作用有关,使得围岩中的 Na^+ 进入到地热水中,局部的阳离子交换作用较强(陶兰初等,2023)。

滇东地区D03、D05、D06温泉Sr含量均较高,均超过0.20 mg/L(表3),流经硅酸盐地层的地下水具有较高的放射性成因 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,而流经碳酸盐地层的地下水则具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值。火山岩、基性深成岩和变质岩、酸性深成岩和变质岩、灰岩、砂岩和页岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值分别为0.7028~0.7071、0.7038~0.7057、0.7107~0.8644、0.7062~0.7156、0.7074~0.7536和0.7279~0.7547(Hajj et al.,2017)。碳酸盐岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.705~0.710,大部分比值在0.708左右(Hajj

et al.,2017;张自超,1995)。D03、D05、D06温泉均具有较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值,具有流经灰岩类地层的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值特征(图3)。D03温泉与D05和D06温泉相比,流经区地层硅酸盐类矿物成分更多,D05和D06温泉的地下热水流经区岩性主要为白云质灰岩或白云岩,表现为富 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 的特征(图4)(韩贵琳和刘丛强,2005)。

图3 滇东地区温泉Sr浓度与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值关系图(据石宏宇等,2021)Fig. 3 The plot of Sr concentration versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of hot springs in eastern Yunnan(after Shi et al.,2021)

富集因子分析是判断和评价元素富集程度和来源的重要方法。富集因子(EF_i)的计算公式可以表示为 $EF_i = \frac{(C_i/C_R)_w}{(C_i/C_R)_R}$ 。其中, C_R 为选取的参比元素浓度, C_i 为样品中元素浓度, “w”为水样中微量元素浓度, “r”为岩石中微量元素浓度。温泉中的元素含量取决于地下热水循环过程中的水-岩反应; 因此, 温泉中的微量元素可以在一定程度上反映水-岩反应的程度。以师宗—弥勒构造带北段玄武岩样品的微量元素平均值组成作为岩石参比值(董云鹏等, 2002), 选用Ni作为参比元素(Wang et al., 2021)。通过富集因子分析方法研究了Be、V、Cr、Co、Cu、Sr、Ba、U元素, 选择Ni浓度进行归一化处理, 结果如图5所示。滇东地区温泉水中Sr、Ba、U富集, Sr和Ba属于大离子亲石元素, 往往与放射性生热元素Th、U共同富集(庄思蝶等, 2022)。D05温泉和D06温泉水样微量元素浓度分布基本一致, Sr元素浓度最大, D06温泉Sr浓度高于D05温泉, 可能与Sr元素富集有关; Fe元素浓度较大, 仅次于

Sr元素, 可能与二叠系宣威组地层含菱铁矿有关。与D05、D06温泉的元素浓度分布特征不同, D03温泉B、Li、Ba元素含量显著高于其他两处温泉, Fe含量显著低于其他两处温泉。D05温泉Sb浓度远高于D03和D06温泉, 达到22.9 $\mu\text{g/L}$, 赋锑地层可能为二叠系茅口组顶部至峨眉山玄武岩组第二段底部呈似层状产出的硅质蚀变岩体(仲麒麟, 2012), 说明D05温泉水循环过程可能流经茅口组地层。

4.2 补给来源和补给高程

Craig(1961)通过研究全球范围内河流、湖泊和降水水样的氢氧同位素, 建立了大气降水中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的关系, 可表示为 $\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$, 即全球大气降水线(GMWL)。根据D03、D05、D06温泉 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据制作 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图(图6)。D03、D06温泉水样中 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均分布在大气降水线上, D05温泉水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布在大气降水线附近, 说明滇东地区温泉水的补给来源均为大气降水。如表5所示, $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 表示温泉水的氢氧同位素组成, $\delta^2\text{H}^*$ 和 $\delta^{18}\text{O}^*$ 表示

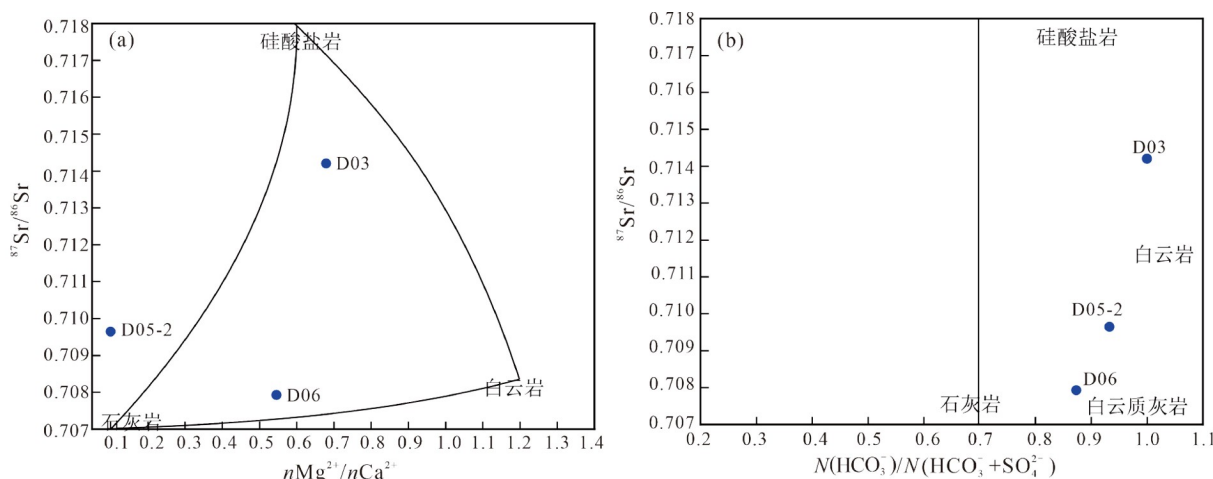


图4 滇东地区温泉水样 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (a)和 $\text{HCO}_3^-/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (b)的关系(据韩贵琳和刘丛强, 2005)

Fig. 4 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio versus molar ratios of $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ (a) and $\text{HCO}_3^-/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ (b) of the hot spring water samples collected from eastern Yunnan(after Han and Liu, 2005)

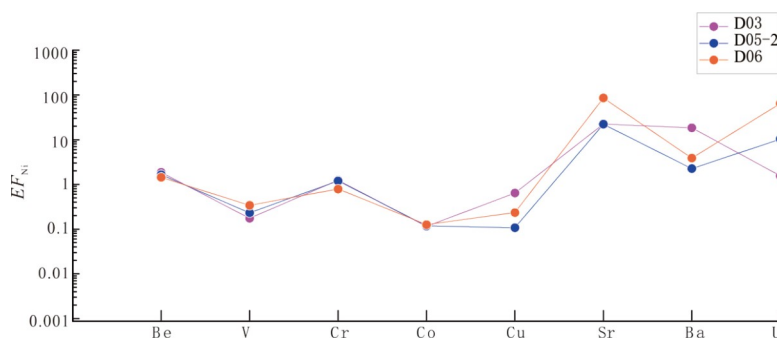
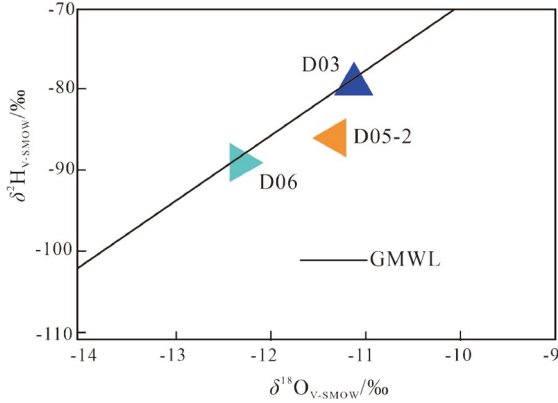


图5 滇东地区温泉水样富集因子分布

Fig. 5 Distribution of enrichment factors of hot spring water samples in eastern Yunnan

表5 滇东地区温泉水样 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析结果Table 5 The analytical results of $\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of hot spring water samples in eastern Yunnan

样品编号	温度/℃	高程/m	$\delta^2\text{H}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^2\text{H}^*/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}^*/\text{‰}$	补给高程 $\delta^2\text{H}/\text{m}$	补给高程 $\delta^{18}\text{O}/\text{m}$
D03	40.5	1867	-79.3	-11.1	-70.0	-10.2	2239	2172
D05-2	61.3	1557	-85.9	-11.3	-66.0	-9.5	2353	2167
D06	36.8	1163	-88.9	-12.3	-59.0	-8.7	2359	2383

图6 滇东地区温泉水样 $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图Fig. 6 The relationship of $\delta^2\text{H}$ - $\delta^{18}\text{O}$ of hot spring water samples in eastern Yunnan

通过在线计算(Online Isotopes Precipitation Calculation, OIPC)(Bowen, 2022)得到的采样点附近降水氢氧同位素组成(Bowen and Revenaugh, 2003; IAEA/WMO, 2015)。

地下水补给高程方程可表示为

$$H = \frac{\delta_s - \delta_p}{K} + h \quad (2)$$

其中, H 为补给区高程(m), h 为泉点高程(m), δ_s 为泉水的同位素组成(‰), δ_p 为采样泉点附近降水的同位素组成(‰), K 为同位素高程梯度(‰/100 m)。具体到 H_2 和 O_2 ,该方程可以转化为(Clark and Fritz, 1997; 卞跃跃和赵丹, 2018)

$$H_{\text{H}} = \frac{\delta^2\text{H}_s - \delta^2\text{H}_p}{K_{\text{H}}} \quad (3)$$

$$H_{\text{O}} = \frac{\delta^{18}\text{O}_s - \delta^{18}\text{O}_p}{K_{\text{O}}} \quad (4)$$

中国西南地区 $\delta^2\text{H}$ 的平均梯度值为 $-2.5\text{‰}/100\text{ m}$ (白玉鹏等, 2021), $\delta^{18}\text{O}$ 以青藏高原平均梯度值来计算, 取为 $-0.295\text{‰}/100\text{ m}$ (Yang et al., 2012)。通过 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 计算温泉的补给高程结果见表5, 两种元素计算结果较为一致, D03、D05、D06温泉的补给高程较为接近, 约在2167~2383 m范围内。

4.3 水-岩反应

Giggenbach(1988)提出的Na-K-Mg三角图通常用于确定水-岩平衡状态, 可根据温泉水样在Na-K-Mg

三角图中的位置, 分为平衡水、部分成熟水和未成熟水。滇东地区温泉水样Na-K-Mg三角图如图7所示, 滇东地区温泉水均属于未成熟水, 集中在 $(\text{Mg}^{2+})^{1/2}$ 端元附近, 说明地下水在上升过程中水-岩反应不充分, 可能接受大气降水补给或冷水的混入(赵德杨等, 2023)。

4.4 热储温度和循环深度

地热温标被广泛用于热储温度的估算。假设地下热水中作为地热温标的矿物仅依赖矿物-流体反应控制, 该反应在热储层中达到平衡, 地下热水出储层后迅速上升至地表, 无再平衡作用、混合或稀释过程(Ni-cholson, 1993)。然而, 在地下热水上升到地表的过程中, 仍可能发生稀释或混合过程。因此, 不同地热温标计算的热储温度也不同。二氧化硅地热温标和阳离子地热温标常用于热储温度的估算。使用的二氧化硅温标包括无蒸汽损失石英温标(Fournier, 1977)、最大蒸汽损失石英温标(Fournier, 1977)、无蒸汽损失玉髓温标(Fournier, 1977)、蒸汽损失玉髓温标(Arnórsson et al., 1983), 阳离子温标包括Na-K温标和K-Mg温标(Giggenbach, 1988)。通过二氧化硅温标和阳离子温标计算得到的滇东地区温泉热储温度, 如表6所示。由图7可知, 滇东地区温泉水均属于未成熟水, 水-岩反应未达平衡状态, 阳离子温标不适合估算滇东地区温泉的热储温度, Na-K温标计算得到的热储温度显著偏高, K-Mg温标得到的热储温度低于泉水温度。由于溶解石英的地下热水达到取样点时未沸腾, 使用无蒸汽损失的二氧化硅温标, 玉髓温标计算得到的热储温度均低于泉水温度, 说明其不适用于估算滇东地区的热储温度。通过石英温标计算得到D03、D05、D06温泉的热储温度分别为 52.0°C 、 79.6°C 、 57.9°C 。

通过硅-焓模型来判断冷水的混入比例以及热储的温度, 模型方程可以表示为

$$S_c X_1 + S_h (1 - X_1) = S_s \quad (5)$$

$$\text{SiO}_{2c} X_2 + \text{SiO}_{2h} X_2 (1 - X_2) = \text{SiO}_{2s} \quad (6)$$

其中, S_c 为冷水的焓(J/g), S_s 为温泉水的终焓(J/g); 100°C 以下的饱和水焓等于水的摄氏温度数; 100°C 以上时, 温度与饱和水焓的关系可通过查表得出; S_h 为热

表 6 滇东地区温泉热储温度计算结果

Table 6 The calculation result of hot spring reservoir temperature in eastern Yunnan

样品编号	温度/℃	SiO ₂ /(mg·L ⁻¹)	SiO ₂ 温标/℃		阳离子温标/℃	
			石英		玉髓	
			无蒸汽损失	最大蒸汽损失	无蒸汽损失	有蒸汽损失
D03	40.5	14.60	52.0	58.8	19.6	31.7
D05-2	61.3	30.17	79.6	83.3	48.3	56.8
D06	36.8	17.23	57.9	64.0	25.7	37.1

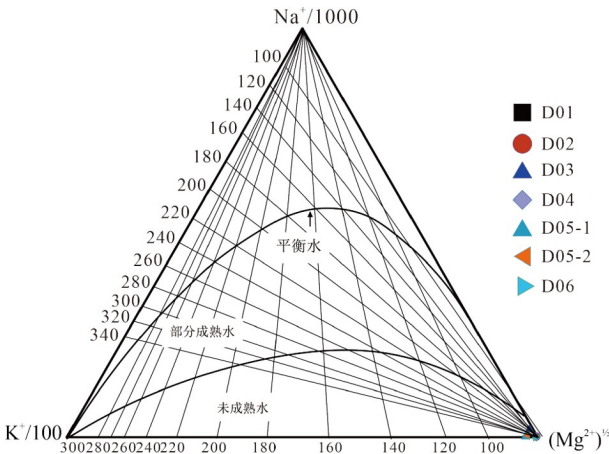


图7 滇东地区温泉水样Na-K-Mg三角图(据Giggenbach, 1988)

Fig. 7 The Na-K-Mg triangle diagram of hot spring water samples in eastern Yunnan (after Giggenbach, 1988)

水初焓(J/g);SiO_{2c}、SiO_{2h}、SiO_{2s}分别代表冷水、热水以及温泉水的SiO₂浓度(mg/L)。X为冷水混合比例(郭

宁等,2020)。D03温泉附近的冷水温度和SiO₂浓度分别为22.6℃和8.68 mg/L(陆良河水样),D05、D06温泉附近的冷水温度和SiO₂浓度分别为22.2℃和12.54 mg/L(甸溪河水样)(Xu and Liu,2007)。滇东地区温泉深部热水温度与混入冷水比例如图8所示。通过计算得到D03、D05和D06温泉混入冷水比例分别为0.66、0.50和0.77,热储温度分别为75.0、100.0、87.5℃(表7)。

地下热水在其循环过程中受到深部热源的加热而增温,循环深度可以通过式(7)大致推断:

$$H = \frac{t-t_0}{I} + H_0$$
 (7)

式中,H为地下热水的循环深度(m),t为热储温度(℃),t₀为当地多年平均气温(℃),I为地温梯度(℃/100 m),H₀为常温带深度(m)。热储温度分别按石英温标计算值和考虑冷水混入后的温度分别计算。D03温泉处地温梯度取陆良盆地的地热梯度(6.42℃/100 m),D05、D06温泉处地温梯度取弥勒城西的地热梯度(7.84℃/100 m)(程先锋,2008),恒温带深度取

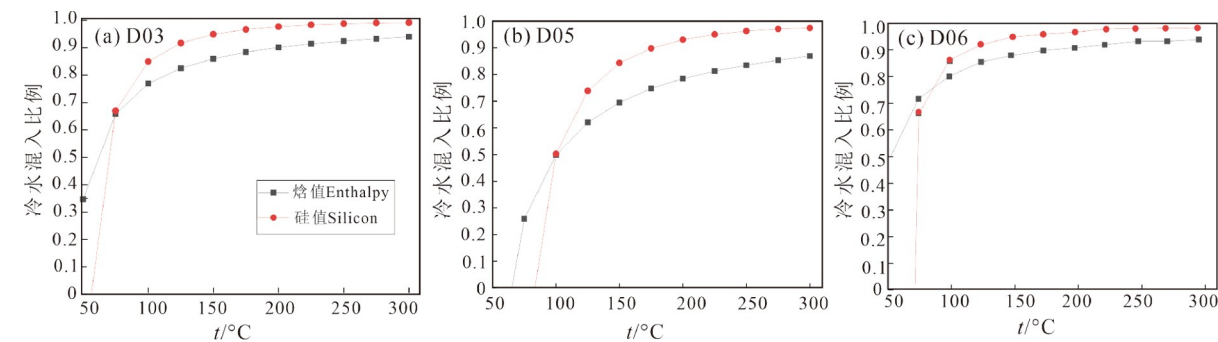


图8 滇东地区温泉深部热水温度与混入冷水比例

Fig. 8 Temperature of deep thermal water and proportion of cold water mixed in hot springs in eastern Yunnan

表 7 滇东地区温泉地下热水循环深度

Table 7 The circulation depth of geothermal water in hot springs in eastern Yunnan

温泉编号	热储温度SiO ₂ 温标/℃	热储温度硅焓模型/℃	地温梯度/(℃/100 m)	循环深度(SiO ₂)/m	循环深度硅焓模型/m
D03	52.0	75.0	6.42	606	965
D05	79.6	100.0	7.84	828	1089
D06	57.9	87.5	7.84	552	929

30 m, D03、D05和D06温泉处 t_0 分别取15、17和17℃, 地下热水的循环深度计算结果如表7所示。

4.5 气体地球化学特征

滇东地区温泉均以 N_2 为主要气体组分。D03温泉 CH_4 气体成分较多, 约占7.04%, D05和D06温泉基本不含 CH_4 气体。滇东地区温泉 CO_2 气体约占2.87%~7.89%, 其他气体组分, 如 O_2 、Ar气体约占0.0063%~1.3162%。温泉气体 H_2 、He含量不高, He约为 33.5×10^{-6} ~ 6104.0×10^{-6} , H_2 约为 1×10^{-6} ~ 11×10^{-6} 。以氮气为主的地下热水, 表明地下热水来源于大气降水入渗, 并在相对封闭的地质环境中运移。温泉气体中除大气成因外, 还有非大气成因的氮气, 其原因可能与变质作用或深部地幔脱气有关(冯明扬等, 2016)。

3个温泉的 $^4He/^{20}Ne$ 存在差异较大, D05温泉两次测量得到的 $^4He/^{20}Ne$ 相对接近, D03温泉的 $^4He/^{20}Ne$ 达到981.0, D06温泉的 $^4He/^{20}Ne$ 为1.8。滇东地区弥勒—富源断裂带温泉气样品的 $^3He/^4He$ 值范围为0.01~0.20 Ra, 具有典型壳源氮的特征, 说明弥勒—富源断裂带并未切穿下地壳或断裂的愈合使其闭合程度较高(王云等, 2018b)。三端元混合模型能够用来分析幔源、壳源、空气来源气体的贡献情况, 空气来源 $R_{观测}/Ra=1$, $^4He/^{20}Ne=0.318$; 地幔来源 $R_{观测}/Ra=8$, $^4He/^{20}Ne=1000$; 地壳来源 $R_{观测}/Ra=0.02$, $^4He/^{20}Ne=1000$ (Sano and Wakita, 1985)。其中, $R_{观测}/Ra$ 为测量的 $^3He/^4He$ 值除以空气中的 $^3He/^4He$ (1.39×10^{-6})(Wang et al., 2023)。 $R_{c改正}/Ra$ 为空气校正的He同位素比值= $[(R_{观测}/Ra)X-1]/(X-1)$; X 为空气归一化比值: $X=(^4He/^{20}Ne)_{实测}/(^4He/^{20}Ne)_{空气}$, 空气的 $^4He/^{20}Ne=0.32$ (Barry et al., 2020)。经过改正后, D03温泉的 $R_{c改正}$ 最小, 其次为D05温泉, 最大的是D06温泉。如图9(a)所示, D03温泉的He气体组分是典型的壳源成因, D05温泉和D06温泉He来源是地壳来源和大气来源, D06温

泉He来源更偏向大气来源。石灰岩的 $\delta^{13}C=0\text{‰}$, $R_{观测}/Ra=0.02$; 地幔的 $\delta^{13}C=-6.5\text{‰}$, $R_{观测}/Ra=8$, 有机沉积物的 $\delta^{13}C=-30\text{‰}$, $R_{观测}/Ra=0.02$ (Sano and Marty, 1995)。如图9(b)所示, D05温泉含碳气体主要是海相碳酸盐成因; D03温泉含碳气体是海相碳酸盐和有机混合成因, D06温泉含碳气体主要为有机成因兼有幔源和海相混合成因。D03和D06温泉气体具有显著的生物成因, 可能与云南弥勒盆地、陆良盆地普遍发育的浅色褐煤层有关(于冰等, 1996), 褐煤的挥发分以 CO_2 和硫化物为主, 在其地下水在循环过程中, 除溶解吸收在土壤中的 CO_2 外, 还接受混杂在地层中的第三纪煤层挥发出的 CO_2 , 并溶解其周围的碳酸盐岩后, 出露地表释放 CO_2 (赵珂等, 2005)。通过对 $^3He/^4He$ 进行大气校正, 可以计算得到幔源He的百分比, 滇东地区温泉气体的幔源He占0%~0.12%(Sano and Wakita, 1985; 周晓成等, 2020)。

D03温泉的 $\delta^{13}C_{CH_4}=-51.2\text{‰}$, 甲烷气体成分属于生物成因, 是甲烷产生菌在严格厌氧环境下产生的(图10)(Whiticar, 1999; Zheng et al., 2013)。通过温泉气体Ar- N_2 -He三角图能够识别地壳、地幔和大气等不同气体来源, D03温泉点落在He与大气的趋势线上, 有壳/幔源成分, D05和D06温泉点落在变质成因 N_2 的区域(图11), 说明气体成分与变质沉积岩相关(Cinti et al., 2017)。

4.6 温泉流体循环模型及其与地震的关系

师宗—弥勒断裂带是滇东地区一条重要的深大断裂, 断裂带是地壳内流体运移的主要通道, 地下流体与断裂带岩石的水岩作用, 对断层强度和强震的发生具有重要影响。白玉鹏等(2021)对D05温泉进行过深入研究, 认为D05温泉水来源于温泉北部和西北部的石炭系马平组(C_3m)灰岩地层, 大气降水通过地表断层和裂隙渗入地下, 使碳酸盐岩地层得到补给, 区内的断裂构造形成良好的地下水传输通道, 深大断裂成为

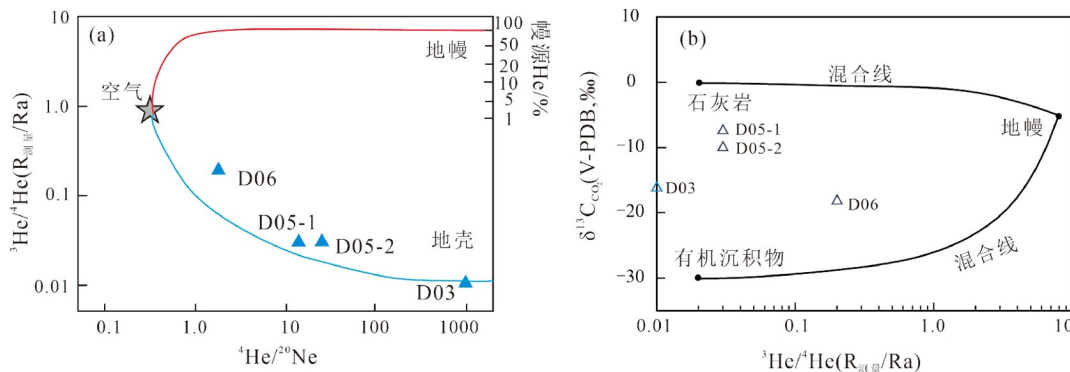


图9 滇东温泉气体样品 $R_{观测}/R_a$ 与 $^4He/^{20}Ne$ (a)和 $\delta^{13}C_{CO_2}$ (b)的关系(据王云等, 2018a)

Fig. 9 The relationships between $R_{观测}/R_a$ and $^4He/^{20}Ne$ (a) and $\delta^{13}C_{CO_2}$ (b) of hot spring gas samples collected in eastern Yunnan (after Wang et al., 2018a)

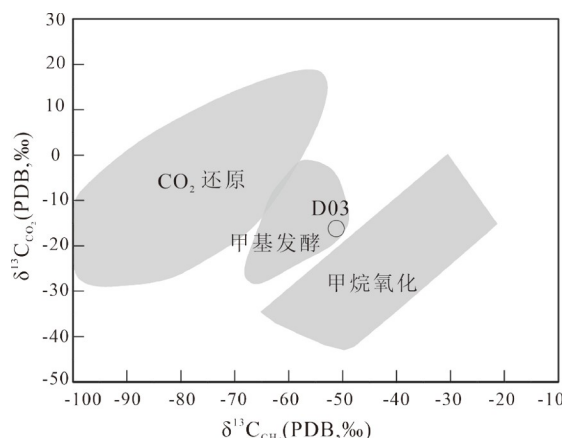


图10 滇东温泉气体样品 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ - $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ 关系图(据周晓成等, 2020)

Fig. 10 The $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ versus $\delta^{13}\text{C}_{\text{CH}_4}$ of hot spring gas samples collected in eastern Yunnan(after Zhou et al., 2020)

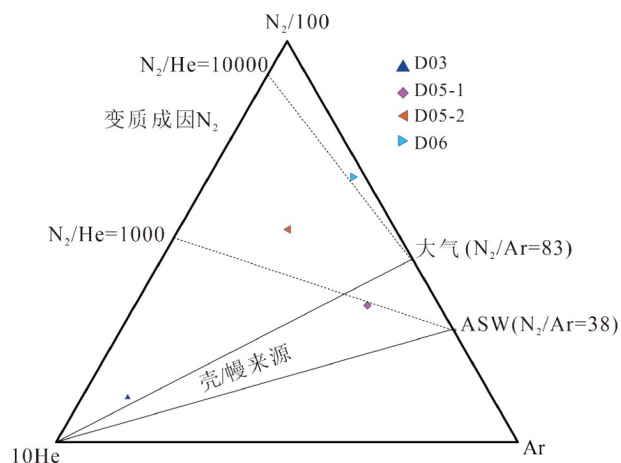


图11 滇东地区温泉气体Ar-N₂-He三角图(据王云等, 2018a)

Fig. 11 The Ar-N₂-He ternary diagram of hot spring gas samples collected in eastern Yunnan(after Wang et al., 2018a)

良好的导热构造。大气降水沿断裂带渗入地下,被大地热流加热成为地下热水,地下热水上升至地表,在上升过程中接受到沿着破碎带和裂隙渗入的浅层冷水,最终混合水沿着断裂带出露至地表(图12)。钻孔资料也表明,D05温泉的热储层为白云质灰岩。D05温泉的热储为二叠系下统茅口组和栖霞组(P_1q+m)。D05温泉直接出露在断层带上,其两盘均为宣威组(P_2x) (程先锋, 2008)。弥勒地区的D06温泉热储层与D05温泉一致,地下热水循环过程与D05温泉类似,但冷水混入比例相对更高。

D03温泉水来自北部山地的大气降水,D03温泉地表出露于新近系上新统(N_2)地层。热储层为中泥盆统曲靖组(D_2q),岩性为生物灰岩—白云岩—页岩。D05温泉的热储温度最高,其次为D06温泉,D03

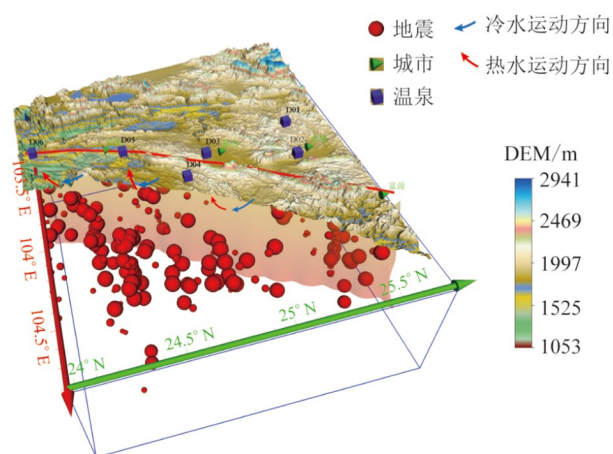


图12 滇东地区温泉地热流体循环模型

Fig. 12 Geothermal fluid circulation model of hot springs in eastern Yunnan

温泉。本工作通过石英温标计算得到的D03、D05和D06温泉热储温度分别为52.0、79.6和57.9℃,王云等(2014)使用《云南省志·温泉志》资料计算得到的D05温泉和D06温泉热储温度为70.4℃和50.5℃。程先锋(2008)采用石英温标计算得到的D05温泉和陆良99钻孔热储层温度分别为70.6℃和45.6℃。通过比较发现,弥勒地区温泉的热储温度稍有增大,与之相应,温泉循环深度也稍有增加。通过石英温标计算D03、D05和D06温泉的热储温度对应的循环深度分别为606、828、552 m,考虑冷水混入的热储温度计算的循环深度分别为965、1089、929 m。不考虑冷水混入的循环深度时,D05温泉最深,D03温泉其次,D06温泉最浅,考虑混合后D03、D05、D06温泉循环深度相差不多。

《云南省志·温泉志》温泉资料空间插值后,王云等(2014)识别出弥勒—富源断裂带温泉水温的高值中心位于D05温泉附近,曲靖断裂带曲靖附近相对高值,高值中心位于小江断裂寻甸附近;热储高温中心位于弥勒西南热水塘火车站温泉附近,曲靖断裂带曲靖附近相对高值,高值中心也位于小江断裂寻甸附近。弥勒—富源断裂带中段均位于低值区。这一分布与地震分布相一致,弥勒—富源断裂南段和北段地震多,中段地震少。其中,弥勒附近地震最多。

弥勒—富源断裂带气体主要为壳源,气体溶解于水中,入渗到地下,在地下水循环过程中,接受混杂在地层中的第三纪煤层挥发出的 CO_2 ,并溶解其周围的碳酸盐岩后,出露地表释放,受幔源成分影响较小。滇东地区 $R_{\text{观测}}/R_a < 0.2$,说明基本上没有幔源氮的释放,具有典型的壳源特征,对应的上地幔属于高波速区域,热流主要依靠地壳生热和热传导(王云等, 2018b)。

云南地区居里面隆起区位于昆明—红河一带。滇东地区的热流高值区主要分布在滇东的断陷盆地,如红河、昆明、小江断裂带沿线。小江断裂以东,居里面深度也相对较浅,地壳浅层产热量较高,尽管该地区实测点位热流为低值,但是由于测点相对较少,特征上与地表高热流值相符合,认为该区域也可能是热流高值区(唐晗等,2020)。小江断裂带及其东侧的云贵高原地区中下地壳存在由于地壳增厚导致壳内长英质物质塑性变形甚至部分熔融而出现低速体,上地幔顶部部分的速度结构在155 km后也存在低速异常,然而70~155 km呈明显的高速异常,表明地壳中的低速体和上地幔的低速体并未联通(张智奇等,2020)。

滇东地区邻近川滇菱形块体东边界,与川滇菱形块体东边界断裂区域的温泉相比,如小江断裂带(Li et al., 2021; 王云等, 2014)、大凉山断裂带(赵德杨等, 2023)、鲜水河断裂带(Tian et al., 2021; 王逸凌等, 2020; 李晓等, 2018),滇东地区温泉的热储温度和循环深度均显著偏低,说明其地震危险相对较低。温泉水的循环深度相对较深,则水对于断裂的弱化程度较高,断裂强度较小,不利于积累较大的应力,中小地震较为频繁,中强地震频度较低(林元武, 1993)。弥勒—富源断裂带的南端弥勒地区地震相对频繁,中小震较多;北端中小震较南端少,但仍有一定数量;中段地震总体较少且地壳浅部只有很少的小地震。地震的发生与地下水对围岩的弱化作用有关,深部流体孔隙压力相对较大,可降低断裂面的有效正压力(Knapp and Knight, 1977; 林元武, 1993)。断裂带中地下水作用的深度越深,对岩石的弱化作用越强,断裂的强度越低,影响断裂的应力积累和地震活动性。应当关注弥勒—富源断裂带南端的地震危险性,其发生中小地震的可能性较高。尽管滇东地区温泉的温度和热储温度总体不高,且具有显著的壳源氦特征,但目前对滇东地区的热流值高低的认识仍不一致,且温泉的循环深度总体较浅,这一区域的监测资料仍较少,也说明对于弥勒—富源断裂带的地震流体地球化学研究程度仍有不足。

温泉流体地球化学特征与地震活动性的关系,对于地震预测和防灾减灾具有重要意义。从地震的中长期预测看,温泉水的循环深度、中深源氦和CO₂气体对区域的地震活动性具有一定指示意义。从地震的短临预测看,温泉水的离子浓度变化、气体组分变化具有地震短临前兆意义。将这些资料与地球物理场观测资料相结合,有利于判断区域的地震风险。因此,有必要进一步加强断裂中段和南端的地震温泉流体地球化学监测,用以研判弥勒—富源断裂带的地震危险性。

5 结论

通过对2016—2020年期间,在滇东地区采集的6个温泉水化样品和3个气体样品进行主量元素、微量元素、氢氧同位素、二氧化硅浓度和锶同位素含量的测试分析,研究了滇东地区,特别是弥勒—富源断裂带的温泉流体地球化学特征,得到以下结论。

(1) 弥勒—富源断裂带温泉水的补给来源以大气降水为主,温泉的补给高程约为2167~2383 m。

(2) 通过SiO₂温标计算得到的弥勒—富源断裂带温泉水循环深度为552~828 m,硅焓模型计算的结果为929~1089 m,与川滇菱形块体东边界断裂带上的温泉相比,循环深度相对较浅。

(3) 弥勒—富源断裂带温泉气体主要为壳源,受幔源成分影响较小。断裂带南端弥勒地区地震相对频繁,中小地震较多,与地下水作用造成岩石弱化,断裂强度相对较小有关。

应当继续关注弥勒—富源断裂带南端的地震危险性,其发生中小地震的可能性较高。尽管滇东地区温泉的温度和热储温度总体不高,且具有显著的壳源氦特征,但目前对滇东地区弥勒—富源断裂带的研究深度不高,其热流值高低的认识也尚不一致,其温泉的循环深度也总体上较浅;因此,有必要加强弥勒—富源断裂带中段和南端的温泉流体地球化学监测。

参考文献 (References):

- 安晓文, 常祖峰. 2018. 云南第四纪活动断裂暨《云南第四纪活动断裂分布图》. 北京: 地震出版社 [An X W, Chang Z F. 2018. Quaternary active faults in Yunnan province and distribution map of Yunnan Quaternary active faults. Seismological Press, Beijing (in Chinese)]
- Arnórsson S, Gunnlaugsson E, Svavarsson H. 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland. III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47(3): 567-577
- 白玉鹏, 李波, 余仕勇, 张秋, 汪斌, 赵宏宇. 2021. 云南弥勒红河谷温泉水文化学特征及成因. *中国岩溶*, 40(2): 290-297 [Bai Y P, Li B, Yu S Y, Zhang Q, Wang B, Zhao H Y. 2021. Hydrochemistry and genesis of the Honghegu hot spring in Mile, Yunnan Province. *Carsologica Sinica*, 40(2): 290-297 (in Chinese with English abstract)]
- 卞跃跃, 赵丹. 2018. 四川康定地热田地下水热水成因研究. *地球学报*, 39(4): 491-497 [Bian Y Y, Zhao D. 2018. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 39(4): 491-497 (in Chinese with English abstract)]
- Barry P H, Negrete-Aranda R, Spelz R M, Seltzer A M, Bekaert D V, Virrueta C, Kulongsoski J T. 2020. Volatile sources, sinks and pathways: A helium-carbon isotope study of Baja California fluids and gases. *Chemical Geology*, 550: 119722
- Bowen G J. 2022. The online isotopes in precipitation calculator, version 3.1. <http://www.waterisotopes.org>

- Bowen G J, Revenaugh J. 2003. Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, 39(10): 1299
- 常祖峰, 毛泽斌, 马保起, 代博洋. 2019. 滇西南阿墨江断裂带与2018年墨江M5.9地震. *地质通报*, 38(6): 967–976 [Chang Z F, Mao Z B, Ma B Q, Dai B Y. 2019. The Amojiang fault zone and Mojiang M5.9 earthquake in 2018 in southern Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 38(6): 967–976 (in Chinese with English abstract)]
- Chen Z, Zhou X, Du J, Xie C, Liu L, Li Y, Yi L, Liu H, Cui Y. 2015. Hydrochemical characteristics of hot spring waters in the Kangding district related to the Lushan $M_s=7.0$ earthquake in Sichuan, China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6): 1149–1156
- 程先锋. 2008. 云南东部地热赋存规律及成因模式(硕士学位论文). 昆明: 昆明理工大学. [Cheng X F. 2008. Occurrence law and genetic model of geothermal energy in eastern Yunnan (Dissertation). Kunming University of Science and Technology, Kunming (in Chinese with English abstract).]
- Cinti D, Tassi F, Procesi M, Brusca L, Cabassi J, Capecchiacci F, Delgado Huertas A, Galli G, Grassa F, Vaselli O, Voltattorni N. 2017. Geochemistry of hydrothermal fluids from the eastern sector of the Sabatini Volcanic District (central Italy). *Applied Geochemistry*, 84: 187–201
- Clark I D, Fritz P. 1997. *Environmental isotopes in hydrogeology*. Boca Raton: Lewis Publishers.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465): 1702–1703
- 崔月菊, 孙凤霞, 杜建国. 2022. 中国大陆东部温泉流体来源解析与地震地球化学异常判识方法. *地震研究*, 45(2): 199–216 [Cui Y J, Sun F X, Du J G. 2022. Methods for identification of seismic geochemical precursors and source partitioning of hot spring fluids in eastern Chinese mainland. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 199–216 (in Chinese with English abstract)]
- 董云鹏, 朱炳泉, 常向阳, 张国伟. 2002. 滇东师宗-弥勒带北段基性火山岩地球化学及其对华南大陆构造格局的制约. *岩石学报*, 18(1): 37–46 [Dong Y P, Zhu B Q, Chang X Y, Zhang G W. 2002. Geochemistry of the basalts from north of the Shizong-Mile Belt, eastern Yunnan Province: Constraints on the tectonic framework of the South China Continent. *Acta Petrologica Sinica*, 18(1): 37–46 (in Chinese with English abstract)]
- 杜毓超, 吕勇, 罗贵荣. 2012. 滇西腾冲盆地温泉水文地球化学特征及其成因. *地质通报*, 31(2–3): 406–412 [Du Y C, Lü Y, Luo G R. 2012. Hydrogeochemical characteristics and genetic analysis of hot springs in Luxi basin, western Yunnan Province. *Geological Bulletin of China*, 31(2–3): 406–412(in Chinese)]
- 冯明扬, 宋汉周, 杨谦, 刘加才. 2016. 江苏部分地热水的气体成分和微量元素含量特征及其指示意义. *水文地质工程地质*, 43(1): 164–170 [Feng M Y, Song H Z, Yang Q, Liu J C. 2016. Characteristics of dissolved gases and trace element in geothermal waters in Jiangsu and their tracing significance. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(1): 164–170 (in Chinese with English abstract)]
- Fournier R O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5(1–4): 41–50
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749–2765
- 郭宁, 刘昭, 男达瓦, 孙会肖, 李皓婷, 赵海华. 2020. 西藏昌都觉拥温泉矿水化学特征及热储温度估算. *地质评论*, 66(2): 499–509 [Guo N, Liu Z, Nan D W, Sun H X, Li H T, Zhao H H. 2020. The characteristics and reservoir temperatures of hot springs in Jueyong, Chamdo, Xizang(Tibet). *Geological Review*, 66(2): 499–509 (in Chinese with English abstract)]
- Hajj F, Poszwa A, Bouchez J, Guérol F. 2017. Radiogenic and “stable” strontium isotopes in provenance studies: A review and first results on archaeological wood from shipwrecks. *Journal of Archaeological Science*, 86: 24–49
- 韩贵琳, 刘丛强. 2005. 贵州喀斯特地区河流的研究: 碳酸盐岩溶解控制的水文地球化学特征. *地球科学进展*, 20(4): 394–406 [Han G L, Liu C Q. 2005. Hydrogeochemistry of rivers in Guizhou Province, China: Constraints on crustal weathering in Karst terrain. *Advance in Earth Sciences*, 20(4): 394–406 (in Chinese with English abstract)]
- IAEA/WMO. Global network of isotopes in precipitation. The GNIP database [DB/OL]. (2005)[2023–03–07]. <https://nucleus.iaea.org/wiser>
- Klemperer S L, Zhao P, Whyte C J, Darrah T H, Crossey L J, Karlstrom K E, Liu T Z, Winn C, Hilton D R, Ding L. 2022. Limited underthrusting of India below Tibet: $^3\text{He}/^4\text{He}$ analysis of thermal springs locates the mantle suture in continental collision. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(12): e2113877119
- Knapp R B, Knight J E. 1977. Differential thermal expansion of pore fluids: Fracture propagation and microearthquake production in hot pluton environments. *Journal of Geophysical Research*, 82(17): 2515–2522
- Li C H, Zhou X C, Yan Y C, Ouyang S P, Liu F L. 2021. Hydrogeochemical characteristics of hot springs and their short-term seismic precursor anomalies along the Xiaojiang fault zone, southeast Tibet Plateau. *Water*, 13(19): 2638
- Li M, Jiang B, Miao Q, Wang G, You Z J, Lan F J. 2020. Multi-phase tectonic movements and their controls on coalbed methane: A case study of No. 9 coal seam from eastern Yunnan, SW China. *Energies*, 13(22): 6003
- 李营, 方震, 张晨蕾, 李继业, 鲍志诚, 张翔, 刘兆飞, 周晓成, 陈志, 杜建国. 2023. 地震流体地球化学短临预测研究进展与展望. *地震地质*, 45(3): 593–621 [Li Y, Fang Z, Zhang C L, Li J Y, Bao Z C, Zhang X, Liu Z F, Zhou X C, Chen Z, Du J G. 2023. Research progress and prospect of seismic fluid geochemistry in short-imminent earthquake prediction. *Seismology and Geology*, 45(3): 593–621 (in Chinese with English abstract)]
- 李晓, 王金山, 黄珣, 余中友. 2018. 鲜水河断裂带康定至道孚段热水化学与同位素特征. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 45(6): 733–745 [Li X, Wang J J, Huang X, Yu Z Y. 2018. Chemical and isotopic characteristics of hot water in the Kangding-Daofu section of Xianshuihe fault zone, Sichuan, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 45(6): 733–745 (in Chinese with English abstract)]
- 李中平, 陶明信, 李立武, 王作栋, 杜丽, 张明峰. 2007. 气相色谱-稳定同位素质谱法测定溶解无机碳同位素. *分析化学*, 35(10): 1455–1458 [Li Z P, Tao M X, Li L W, Wang Z D, Du L, Zhang M F. 2007. Determination of isotope composition of dissolved inorganic carbon by gas-chromatography-conventional isotope-ratio mass spectrometry. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 35(10): 1455–1458 (in Chinese with English abstract)]
- 刘汉彬, 金贵善, 李军杰, 韩娟, 张建锋, 张佳, 钟芳文, 郭东侨. 2013. 铀矿地质样品的稳定同位素组成测试方法. *世界核地质科学*, 30(3): 174–179

- [Liu H B, Jin G S, Li J J, Han J, Zhang J F, Zhang J, Zhong F W, Guo D Q. 2013. Determination of stable isotope composition in uranium geological samples. *World Nuclear Geoscience*, 30(3): 174–179 (in Chinese with English abstract)]
- 刘辛中, 张风霜, 马伶俐, 李腊月. 2022. 川滇菱形块体东边界现今应变积累特征及强震危险性. *大地测量与地球动力学*, 42(7): 687–693 [Liu X Z, Zhang F S, Ma L L, Li L Y. 2022. Current strain accumulation characteristics and the risk of strong earthquakes on the eastern boundary of the Sichuan-Yunnan Block. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 42(7): 687–693 (in Chinese with English abstract)]
- 林向东, 徐平, 武敏捷, 武安绪. 2010. 小江断裂中段及邻区构造应力场分布特征. *中国地震*, 26(2): 192–200 [Lin X D, Xu P, Wu M J, Wu A X. 2010. Inversion of stress field in middle section of the Xiaojiang fault and its adjacent area. *Earthquake Research in China*, 26(2): 192–200 (in Chinese with English abstract)]
- 林元武. 1993. 红河断裂带北段温泉水循环深度与地震活动性的关系探讨. *地震地质*, 15(3): 193–206 [Lin Y W. 1993. A discussion on the relation of circulation depth of hot spring water to seismic activity on the northern segment of the Honghe fault zone. *Seismology and Geology*, 15(3): 193–206 (in Chinese with English abstract)]
- Molnar P, England P, Martinod J. 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31(4): 357–396
- Nicholson, K. 1993. *Geothermal fluids: Chemistry and exploration techniques*. Berlin: Springer-Verlag
- 欧阳澍培, 周晓成, 何苗, 天娇, 李静超, 董金元, 李营, 颜玉聪, 刘峰立, 姚炳宇, 王昱文, 曾召君, 陈曲菲, 罗志鑫, 吉庚凤. 2023. 云南宁洱—通关火山区温泉水文地球化学与地震短临前兆异常特征研究. *地震研究*, 46(1): 37–48 [Ouyang S P, Zhou X C, He M, Tian J, Li J C, Dong J Y, Li Y, Yan Y C, Liu F L, Yao B Y, Wang Y W, Zeng Z J, Chen Q F, Luo Z X, Ji G F. 2023. The characteristics of the hydrogeochemical seismic anomaly of hot springs in the Ning'er-Tongguan volcanic area. *Journal of Seismological Research*, 46(1): 37–48 (in Chinese with English abstract)]
- Peng H C, Gao Z H, Hu J F, Yang H Y, Badal J, Chen M X, Zhang T J. 2022. Upper mantle anisotropy in the southeastern margin of the Tibetan Plateau and geodynamic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 327: 106877
- 覃玉玺, 潘用泛. 1982. 云南省温泉区划与地震空间关系的初步探讨. *地震研究*, 5(2): 199–211 [Qin Y X, Pan Y F. 1982. Primary study of relation between spring zoning and earthquake spatial distribution in Yunnan province. *Journal of Seismological Research*, 5(2): 199–211 (in Chinese with English abstract)]
- 冉华, 陈坤华, 孙自刚, 王恩康. 2009. 离子色谱法测定温泉水中多种阴阳离子. *地震研究*, 32(S1): 498–502 [Ran H, Chen K H, Sun Z G, Wang E K. 2009. Determination of several ions in hot spring water by ion chromatography. *Journal of Seismological Research*, 32(S1): 498–502 (in Chinese)]
- Sano Y, Marty B. 1995. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, 119(1–4): 265–274
- Sano Y, Wakita H. 1985. Geographical distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios in Japan: Implications for arc tectonics and incipient magmatism. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 90(B10): 8729–8741
- 邵维晔, 王云, 李其林, 番绍辉. 2022. 红河断裂带温泉水文地球化学及构造活动特征研究. *矿物岩石地球化学通报*, 41(3): 612–624 [Shao W Y, Wang Y, Li Q L, Fan S H. 2022. A study on hydrogeochemistry and tectonic activity features of hot springs in the red river fault zone. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(3): 612–624 (in Chinese with English abstract)]
- 石宏宇, 王万丽, 周晓成, 颜玉聪, 李鹏飞, 姜莉, 陈志. 2021. 四川石棉公益海温泉水文地球化学特征. *地震*, 41(1): 93–115 [Shi H Y, Wang W L, Zhou X C, Yan Y C, Li P F, Jiang L, Chen Z. 2021. Hydrogeochemical characteristics of Gongyihai hot spring, in Shimian County, Sichuan Province. *Earthquake*, 41(1): 93–115 (in Chinese with English abstract)]
- 石宏宇, 周晓成, 王万丽, 颜玉聪, 李鹏飞, 姜莉. 2022. 岷江断裂带北段温泉水文地球化学特征. *中国地震*, 38(1): 61–79 [Shi H Y, Zhou X C, Wang W L, Yan Y C, Li P F, Jiang L. 2022. Geochemical characteristics of hot spring fluids along the Minjiang fault zone. *Earthquake Research in China*, 38(1): 61–79 (in Chinese with English abstract)]
- 石显耀, 曹代勇, 林玉成, 郑志红. 2009. 滇东地区控煤构造样式研究. *中国煤炭地质*, 21(12): 24–27, 33 [Shi X Y, Cao D Y, Lin Y C, Zheng Z H. 2009. Study on coal-control structural pattern in eastern Yunnan area. *Coal Geology of China*, 21(12): 24–27, 33 (in Chinese with English abstract)]
- 汤飞, 毛忠华. 2004. 南盘江流域水文特性分析. *红水河*, 23(2): 3–7 [Tang F, Mao Z H. 2004. Analysis of hydrology characteristics in Nanpanjiang basin. *Hongshui River*, 23(2): 3–7 (in Chinese with English abstract)]
- 唐哈哈, 郭良辉, 方圆. 2020. 青藏高原东南缘热流估算及与地震活动相关性分析. *地球物理学报*, 63(3): 1056–1069 [Tang H H, Guo L H, Fang Y. 2020. Estimation of heat flow in southeastern margin of Tibetan Plateau and its analysis of the correlation with earthquake activity. *Chinese Journal of Geophysics*, 63(3): 1056–1069 (in Chinese with English abstract)]
- 唐淑玲, 汤达祯, 许浩, 陶树, 李松. 2016. 黔西地层热流体差异作用及其煤层气成藏效应. *煤炭科学技术*, 44(2): 8–16 [Tang S L, Tang D Z, Xu H, Tao S, Li S. 2016. Differential effect of hydrothermal fluid in formation and accumulation effect of coalbed methane in West Guizhou. *Coal Science and Technology*, 44(2): 8–16 (in Chinese with English abstract)]
- Tang S L, Tang D Z, Xu H, Tao S, Li S, Geng Y G. 2016. Geological mechanisms of the accumulation of coalbed methane induced by hydrothermal fluids in the western Guizhou and eastern Yunnan regions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 33: 644–656
- 汤书婷, 王晓明, 崔建勇, 刘宇昂. 2015. 全岩样品碳酸盐矿物选择性溶解方法改进及其锶同位素比值测定. *世界核地质科学*, 32(1): 51–56 [Tang S T, Wang X M, Cui J Y, Liu Y A. 2015. Method improvement of selective dissolution of carbonate minerals in whole rock samples and determination of strontium isotopic ratio. *World Nuclear Geoscience*, 32(1): 51–56 (in Chinese with English abstract)]
- 陶兰初, 朱星强, 马一奇, 张七道, 庞龙, 涂春霖, 和成忠. 2023. 滇东老厂地区地热成因: 来自水化学和碳氢氧硫同位素的约束. *沉积与特提斯地质*, 43(2): 295–310 [Tao L C, Zhu X Q, Ma Y Q, Zhang Q D, Pang L, Tu C L, He C Z. 2023. Genesis of geothermal water in the Laochang area, eastern Yunnan Province: Constraints from hydrochemistry and C-H-O-S isotopes. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 43(2): 295–310 (in Chinese with English abstract)]

- 陶志刚, 曹代勇, 李建, 石显耀, 林玉成, 王坚. 2011. 滇东地区煤田构造格局与煤系赋存规律的研究. 中国煤炭地质, 23(8): 56–59 [Tao Z G, Cao D Y, Li J, Shi X Y, Lin Y C, Wang J. 2011. Study on coalfield structural framework and coal measures hosting pattern in eastern Yunnan area. Coal Geology of China, 23(8): 56–59 (in Chinese with English abstract)]
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, Meyer B, Arnaud N, Wittlinger G, Yang J S. 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau. Science, 294(5547): 1671–1677
- 天娇, 朱瑞杰, 琚长辉, 田雷, 周晓成. 2024. 温泉水化学变化在地震监测预测中的研究进展. 地震, doi:10.12196/j.issn.1000–3274.2024.04.007 [Tian J, Zhu R J, Ju C H, Tian L, Zhou X C. 2024. Research progress in chemical change of hot spring water in earthquake monitoring and prediction. Earthquake, doi:10.12196/j.issn.1000–3274.2024.04.007 (in Chinese with English abstract)]
- Tian J, Pang Z H, Liao D W, Zhou X C. 2021. Fluid geochemistry and its implications on the role of deep faults in the genesis of high temperature systems in the eastern edge of the Qinghai Tibet Plateau. Applied Geochemistry, 131: 105036
- Wang B, Zhou X C, Zhou Y S, Yan Y C, Li Y, Ouyang S P, Liu F L, Zhong J. 2021. Hydrogeochemistry and precursory anomalies in thermal springs of Fujian (southeastern China) associated with earthquakes in the Taiwan strait. Water, 13(24): 3523
- Wang Y C, Zhou X C, Tian J, Zhou J L, He M, Li J C, Dong J Y, Yan Y C, Liu F L, Yao B Y, Wang Y W, Zeng Z J, Liu K Y, Li L W, Li Z P, Xing L T. 2023. Volatile characteristics and fluxes of He-CO₂ systematics in the southeastern Tibetan Plateau: Constraints on regional seismic activities. Journal of Hydrology, 617: 129042
- 王伶俐, 王青华, 张勇, 王岩. 2016. 基于GPS的云南地区主要断裂带现今运动特征分析. 防灾科技学院学报, 18(1): 1–8 [Wang L L, Wang Q H, Zhang Y, Wang Y. 2016. Analysis of current activity of main faults in Yunnan Region based on GPS. Journal of Institute of Disaster Prevention, 18(1): 1–8 (in Chinese with English abstract)]
- 王逸凌, 穆文清, 史渐明. 2020. 鲜水河断裂南段温泉水文地球化学特征. 地震研究, 43(2): 287–295, 418 [Wang Y L, Mu W Q, Shi Z M. 2020. Hydrogeochemical characteristics of hot springs in south segment of the Xianshuihe fault zone. Journal of Seismological Research, 43(2): 287–295, 418 (in Chinese with English abstract)]
- 王云, 赵慈平, 刘峰, 陈坤华, 冉华. 2014. 小江断裂带及邻近地区温泉地球化学特征与地震活动关系研究. 地震研究, 37(2): 228–243, 323 [Wang Y, Zhao C P, Liu F, Chen K H, Ran H. 2014. Research on relationship between geochemical characteristics of thermal springs and seismic activity in Xiaojiang fault zone and its adjacent area. Journal of Seismological Research, 37(2): 228–243, 323 (in Chinese with English abstract)]
- 王云, 赵慈平, 李其林, 刘耀炜. 2018a. 滇东南楔形构造区典型地热流体地球化学特征研究. 地震研究, 41(4): 534–543 [Wang Y, Zhao C P, Li Q L, Liu Y W. 2018a. Study on geochemical characteristics of geothermal fluid in the wedge-shaped tectonics, southeast Yunnan. Journal of Seismological Research, 41(4): 534–543 (in Chinese with English abstract)]
- 王云, 李其林, 冉华, 赵慈平, 刘耀炜. 2018b. 青藏高原东南缘地热与地震活动: 来自氮同位素的约束. 矿物岩石地球化学通报, 37(4): 652–662 [Wang Y, Li Q L, Ran H, Zhao C P, Liu Y W. 2018b. Geothermal and seismic activities in the Southeastern Tibetan Plateau: Constraints from helium isotopes. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 37(4): 652–662 (in Chinese with English abstract)]
- Whiticar M J. 1999. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane. Chemical Geology, 161(1–3): 291–314
- 吴志亮, 梁永宁. 2002. 陆良盆地、牛头山古岛与彩沙物源. 云南地质, 22(4): 443–449 [Wu Z L, Liang Y N. 2002. Luliang basin, Niutoushan palaeo-island and the origin of colorful sand in Luliang. Yunnan Geology, 22(4): 443–449 (in Chinese with English abstract)]
- Xu X W, Wen X Z, Zheng R Z, Ma W T, Song F M, Yu G H. 2003. Pattern of latest tectonic motion and its dynamics for active blocks in Sichuan-Yunnan region, China. Science in China Series D: Earth Sciences, 46(2): 210–226
- Xu Z F, Liu C Q. 2007. Chemical weathering in the upper reaches of Xijiang River draining the Yunnan-Guizhou Plateau, Southwest China. Chemical Geology, 239(1–2): 83–95
- 杨继登. 1985. 对滇东及川西部份地区强震活动特征及未来地震趋势的估计. 地震研究, 8(5): 523–531 [Yang J D. 1985. Estimation of the features of strong earthquake activities and the future seismic trend of eastern Yunnan and western Sichuan provinces. Journal of Seismological Research, 8(5): 523–531 (in Chinese with English abstract)]
- 杨琼波, 保国华. 2014. 珠江流域旬溪河径流量演变趋势及突变分析. 人民珠江, 35(4): 17–20 [Yang Q B, Bao G H. 2014. Evolution trend and abrupt change analysis of Dianxi River runoff in Pearl River basin. Pearl River, 35(4): 17–20 (in Chinese)]
- Yang X X, Xu B Q, Yang W, Qu D M. 2012. The Indian Monsoonal influence on altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in surface water on southeast Tibetan Plateau. Science China Earth Sciences, 55(3): 438–445
- 殷瑛, 王明珠, 何绕生. 2006. 云南地热资源及其开发前景. 云南地质, 25(1): 70–75 [Yin Y, Wang M Z, He R S. 2006. The geothermal resources of Yunnan and their development potentiality. Yunnan Geology, 25(1): 70–75 (in Chinese with English abstract)]
- 于冰, 王士俊, 张井, 唐家祥. 1996. 云南第三纪浅色褐煤成煤物质及成因. 煤田地质与勘探, 24(4): 12–14 [Yu B, Wang S J, Zhang J, Tang J X, Tang J X. 1996. The coal-forming material and genesis of light brown coal from tertiary in Yunnan province. Coal Geology & Exploration, 24(4): 12–14 (in Chinese)]
- 曾普胜, 李华, 朱晓华, 麻菁, 苟瑞涛, 王聚杰. 2015. 云南曲靖盆地蔡家冲粗面英安质凝灰岩: 扬子克拉通内曲靖深断裂新生代强烈活动的证据. 地质通报, 34(10): 1826–1836 [Zeng P S, Li H, Zhu X H, Ma J, Gou R T, Wang J J. 2015. Trachytic dacitic tuffs in Caijiachong, Qujing Basin, Yunnan Province: Evidence for a strong activity of the Qujing deep fault within the Yangtze craton. Geological Bulletin of China, 34(10): 1826–1836 (in Chinese with English abstract)]
- 张贵, 张华, 王波, 张文望, 高瑜, 何绕生, 周翠琼, 彭淑惠. 2021. 滇东岩溶高原矿泉水类型及地质控制. 地球学报, 42(3): 333–340 [Zhang G, Zhang H, Wang B, Zhang W J, Gao Y, He R S, Zhou C Q, Peng S H. 2021. Mineral water types and geological control in Karst Plateau of eastern Yunnan. Acta Geoscientica Sinica, 42(3): 333–340 (in Chinese with English abstract)]
- 张炜斌, 杜建国, 周晓成, 陈志, 谢超, 崔月菊. 2013. 首都圈西部盆岭构造区

- 地热水水文地球化学研究. 矿物岩石地球化学通报, 32(4): 489–496 [Zhang W B, Du J G, Zhou X C, Chen Z, Xie C, Cui Y J. 2013. Hydrogeochemistry of thermal waters from the basin-range province in the west region of Beijing. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 32(4): 489–496 (in Chinese with English abstract)]
- 张彦辉, 张良圣, 常阳, 范增伟, 郭冬发. 2018. 增压-微波消解电感耦合等离子体质谱法测定含难溶矿物岩石样品中的微量元素. 铀矿地质, 34(2): 105–111 [Zhang Y H, Zhang L S, Chang Y, Fan Z W, Guo D F. 2018. Determining trace elements in rock samples containing refractory minerals by pressurize-microwave inductively coupled plasma mass spectrometry. Uranium Geology, 34(2): 105–111 (in Chinese with English abstract)]
- 张自超. 1995. 我国某些元古宙及早寒武世碳酸盐岩石的锶同位素组成. 地质论评, 41(4): 349–354 [Zhang Z C. 1995. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ data for some middle-late Proterozoic to early Cambrian carbonate rocks in China. Geological Review, 41(4): 349–354 (in Chinese with English abstract)]
- 张智奇, 姚华建, 杨妍. 2020. 青藏高原东南缘地壳上地幔三维S波速度结构及动力学意义. 中国科学: 地球科学, 50(9): 1242–1258, 1–2 [Zhang Z Q, Yao H J, Yang Y. 2020. Shear wave velocity structure of the crust and upper mantle in Southeastern Tibet and its geodynamic implications. Scientia Sinica (Terrae), 50(9): 1242–1258, 1–2 (in Chinese with English abstract)]
- 赵德杨, 周晓成, 何苗, 天娇, 李静超, 董金元, 颜玉聪, 欧阳澍培, 刘峰立, 姚炳宇, 王昱文, 曾召君, 陈曲非, 张晓明, 杨耀, 罗志鑫. 2023. 大凉山断裂带温泉水文地球化学特征. 地震研究, 46(1): 26–36 [Zhao D Y, Zhou X C, He M, Tian J, Li J C, Dong J Y, Yan Y C, Ouyang S P, Liu F L, Yao B Y, Wang Y W, Zeng Z J, Chen Q F, Zhang X M, Yang Y, Luo Z X. 2023. Hydrogeochemical characteristics of the hot springs in the daliangshan fault zone. Journal of Seismological Research, 46(1): 26–36 (in Chinese with English abstract)]
- 赵珂, 姜光辉, 杨琰, 刘德深, 刘玉, 王丽丽. 2005. 滇东主要断裂带温泉 CO_2 成因浅析. 地球与环境, 33(2): 11–15 [Zhao K, Jiang G H, Yang Y, Liu D S, Liu Y, Wang L L. 2005. Brief analysis of the reasons of CO_2 degassing from hot springs on main faults within the east of Yunnan. Earth and Environment, 33(2): 11–15 (in Chinese with English abstract)]
- Zheng G D, Xu S, Liang S Y, Shi P L, Zhao J. 2013. Gas emission from the qingzhu river after the 2008 Wenchuan earthquake, Southwest China. Chemical Geology, 339: 187–193
- 仲麒麟. 2012. 贵州二叠系“大厂式”锑矿控矿规律与成矿模式. 矿产勘查, 3(6): 761–766 [Zhong Q W. 2012. Metallogenetic regularity and metallogenic model of “Dachang type” antimony deposit in Guizhou. Mineral Exploration, 3(6): 761–766 (in Chinese with English abstract)]
- Zhou X C, Liu L, Chen Z, Cui Y J, Du J G. 2017. Gas geochemistry of the hot spring in the Litang fault zone, Southeast Tibetan Plateau. Applied Geochemistry, 79: 17–26
- 周晓成, 王万丽, 李立武, 侯建民, 邢蓝田, 李中平, 石宏宇, 颜玉聪. 2020. 金沙江-红河断裂带温泉气体地球化学特征. 岩石学报, 36(7): 2197–2214 [Zhou X C, Wang W L, Li L W, Hou J M, Xing L T, Li Z P, Shi H Y, Yan Y C. 2020. Geochemical features of hot spring gases in the Jinshajiang-Red River fault zone, Southeast Tibetan Plateau. Acta Petrologica Sinica, 36(7): 2197–2214 (in Chinese with English abstract)]
- 庄思蝶, 周晓成, 李鹏飞, 史浙明, 赛买尔那吉·喀依木, 朱成英, 颜玉聪. 2022. 新疆塔什库尔干断裂带温泉环境地球化学特征. 地球科学与环境学报, 44(4): 699–712 [Zhuang S D, Zhou X C, Li P F, Shi Z M, Kayimu S, Zhu C Y, Yan Y C. 2022. Environmental hydrogeochemical characteristics of hot springs in Tashkurgan fault zone of Xinjiang, China. Journal of Earth Sciences and Environment, 44(4): 699–712 (in Chinese with English abstract)]

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 肖保华)