

赣南寻乌—石城断裂带温泉流体地球化学特征

肖富强, 邹勇军, 章双龙, 祁 星, 肖卫东

Geochemical characteristics of hot spring fluids in the Xunwu-Shicheng fault zone of southern Jiangxi

XIAO Fuqiang, ZOU Yongjun, ZHANG Shuanglong, QI Xing, and XIAO Weidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401009>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

云南勐海县勐阿街温泉水化学和同位素特征及成因

Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the Mengajie hot spring in Menghai county of Yunnan

谭梦如, 周训, 张齐, 刘海生, 余鸣潇, 海阔 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 70–70

贵州洪家渡盆地泉水水化学和碳同位素特征及成因

Characteristics and controls of the hydrochemistry and carbon isotope of the spring water in the Hongjiadu Basin of Guizhou

任坤, 潘晓东, 焦友军, 黄宇, 曾洁, 彭聪, 梁嘉鹏 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 9–9

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9–18

涿源北盆地地下水氢氧同位素特征及北海泉形成模式

Characteristics of hydrogen and oxygen isotopes in the groundwater and formation mode of the Beihai springs in the northern Laiyuan Basin

王忠亮, 郭春艳, 张彦鹏 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 27–35

玛曲高原区潜水水化学和氢氧同位素特征

Hydrochemical and hydrogen and oxygen isotope characteristics of subsurface water in the Maqu Plateau

王振, 郭华明, 刘海燕, 赵威光, 刘帅, 王娇, 沈萌萌 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 18–26

西藏加查象牙泉水文地球化学特征及成因

Hydrogeochemical characteristics and formation of the Ivory Spring in Jiacha County of Tibet

章旭, 郝红兵, 刘康林, 毛武林, 肖尧 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 1–9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202401009

肖富强, 邹勇军, 章双龙, 等. 赣南寻乌—石城断裂带温泉流体地球化学特征 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 203-216.
XIAO Fuqiang, ZOU Yongjun, ZHANG Shuanglong, et al. Geochemical characteristics of hot spring fluids in the Xunwu-Shicheng fault zone of southern Jiangxi[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 203-216.

赣南寻乌—石城断裂带温泉流体地球化学特征

肖富强^{1,2,3}, 邹勇军^{1,2,3}, 章双龙^{1,2}, 祁星^{2,3}, 肖卫东^{2,3}

(1. 关键矿产资源勘查与开发江西省重点实验室, 江西南昌 330001; 2. 江西省地质调查勘察院, 江西南昌 330001; 3. 江西省煤田地质勘察研究院, 江西南昌 330001)

摘要: 寻乌—石城断裂带是赣南东部发育的一条 NNE 向深大断裂带, 温泉发育密集且地震活动频繁, 以往关于其温泉流体特征及演化机制研究甚少, 制约了温泉资源的可持续开发利用。为了揭示该断裂带温泉流体地球化学特征及其成因和来源, 更好地开展地热资源勘查研究, 采集了断裂带上 9 组温泉气、水样品, 采用分光光度法、色谱法、质谱法进行了水化学组成、气体组分、同位素分析。结果表明: (1) 寻乌—石城断裂带温泉水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型和 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型; 温泉是大气降水沿断裂带渗入深部热储结构加热形成; 温泉水为水岩作用未达到平衡的未成熟水, 通过 SiO_2 温标估算的热储温度在 99~143 °C 之间。(2) 温泉气体组分以 CO_2 和 N_2 为主, 普遍含有 He; CO_2 主要是无机幔源成因, He 以壳源成因为主、幔源成因为辅, 幔源 CO_2 、He 具有显著成因联系, 为断裂带沟通深部流体上涌形成。(3) 在寻乌—石城断裂带地幔深源流体异常释放作用下, 热储温度、幔源气体参数等温泉流体特征与构造和地震活动性有较好的对应关系, 断裂带南段是探寻中高温地热资源的有利区。研究结果对指导寻乌—石城断裂带下一步地热资源勘探具有重要意义。

关键词: 寻乌—石城断裂带; 温泉流体; 水化学组成; 气体化学组成; 同位素

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0203-14

Geochemical characteristics of hot spring fluids in the Xunwu-Shicheng fault zone of southern Jiangxi

XIAO Fuqiang^{1,2,3}, ZOU Yongjun^{1,2,3}, ZHANG Shuanglong^{1,2}, QI Xing^{2,3}, XIAO Weidong^{2,3}

(1. Jiangxi Province Key Laboratory of Exploration and Development of Critical Mineral Resources, Nanchang, Jiangxi 330001, China; 2. Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang, Jiangxi 330001, China; 3. Jiangxi Provincial Coal Geological Exploration and Research Institute, Nanchang, Jiangxi 330001, China)

Abstract: The Xunwu-Shicheng fault zone, located in the eastern part of southern Jiangxi, is a NNE-trending deep fault zone characterized by dense geothermal hot spring activity and frequent seismic events. However, limited research on the characteristics and evolutionary mechanisms of its hot spring fluids has hindered the sustainable development and utilization of geothermal resources. To reveal the geochemical characteristics and origin of hot spring fluids in the fault zone to support the geothermal resource exploration, hot spring water samples and gas samples from nine hot springs were collected. Water chemical composition, gas composition, and isotope analysis

收稿日期: 2024-01-04; 修订日期: 2024-08-20

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目(2022JXDZKJRC05); 江西省地质局科技基金项目(20200107)

第一作者: 肖富强(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产地质勘查与研究。E-mail: xiaofq1218@163.com

通讯作者: 章双龙(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质科学研究。E-mail: longswpu@126.com

of the hot springs were tested by spectrophotometry, chromatography, mass spectrometry, etc. The results show that the hydrochemical types of hot springs in the Xunwu-Shicheng fault zone are mainly $\text{HCO}_3\text{—SO}_4\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ and $\text{HCO}_3\text{—Na}$. The hot springs are formed by the heating of precipitation infiltrating deep thermal storage structures along fault zones. The hot spring water is immature water whose water-rock interaction has not reached equilibrium, and the reservoir temperature is estimated to be 99–143 °C by SiO_2 geothermometer. The gas components in hot springs are mainly CO_2 and N_2 , with traces of He. CO_2 is mainly derived from inorganic mantle sources, while He originates predominantly from crust, with a secondary contribution mantle. Mantle-derived CO_2 and He have significant genetic connections, formed by the upwelling of deep fluids connected by the fault zones. Under the abnormal release of deep mantle fluids in the Xunwu-Shicheng fault zone, the characteristics of hot spring fluids such as thermal storage temperature and mantle gas parameters have a good correspondence between tectonic and seismic activity. The southern section of the fault zone is a favorable area for exploring medium-high temperature geothermal resources. This study provides valuable insights for guiding further of hot spring resource exploration in the Xunwu-Shicheng fault zone.

Keywords: Xunwu-Shicheng fault zone; hot spring fluid; hydrochemical compositions; gas chemical composition; isotope

地热资源具有低碳清洁、稳定、可持续等诸多优势,合理开发利用温泉资源既可以带动地方经济发展,也能有效减缓气候变暖问题,具有巨大的经济和环境效益^[1-3]。地热资源优势的逐渐凸显,正成为当下应对“双碳”目标的重点研究方向。温泉是地热资源在地表释放的一种表现形式,属于水热型地热资源,是以水为介质把热能从地下携带至地表的自然现象^[4],同时也是地球深源流体向地表释放的重要通道^[5]。温泉流体地球化学特征及变化、成因机制研究备受关注^[6],通过地球化学方法能够有效揭示多种温泉流体信息^[7],是研究温泉流体成因、温泉水来源、热储温度及构造背景的重要证据^[8-9],亦能获取丰富的地下水岩作用信息、深部构造信号和了解地壳与地幔流体的循环机理^[10]。识别并研究这些温泉流体地球化学特征,更是深入揭示温泉形成地质和构造机理、评价温泉水资源质量和高效开发利用温泉资源的基础^[11-12]。

江西省地处中国东南沿海地热带,是我国地热资源分布较为丰富的省份之一,境内地热资源类型多、分布广,具有重要的科研价值、经济价值和生态环境价值^[13-14]。根据成热条件,江西省内地热资源成因类型划分为隆起断裂型和沉积盆地型^[15],前者为主要的温泉成因类型,并形成幕阜—罗霄—诸广、雪山—九连山和怀玉—武夷山 3 条地热带^[16]。赣南地区横跨上述 3 条地热带,区内导热构造发育,成热条件较好,蕴含丰富的温泉资源,分布温泉区多达 60 余处^[17]。寻乌—石城断裂带作为赣南地区的一条重要导热断裂,对沿

线温泉的形成和发育有至关重要的作用。孙占学等^[18]采用气体地球化学和同位素分析手段,分析了寻乌—石城断裂带南部横迳地区温泉水及气体化学组成及成因,发现温泉气体具有显著幔源成因特征。高柏等^[19]进一步对横迳地区地热气体中 CO_2 、He 的幔源无机成因进行厘定,发现 CO_2 、He 为幔源无机成因。王进等^[20]、叶海龙等^[21]基于地热勘探工作,探讨了断裂带北部石城地区对流型地热系统特征及成因,认为温泉水是经深循环后增温形成,具有对流特征,整个地热区同属一个地热系统。

以上关于该断裂带温泉的研究,多关注区温泉资源勘探、温泉水成因等,对断裂带沿线温泉链流体特征及成因缺乏系统性和整体性的深入研究,并且断裂带不同位置构造活动性的差异所引起的断裂带上温泉流体表现出的不同地球化学特征,以及温泉流体地球化学特征反演断裂、构造活动性规律等问题都值得深入研究。本文以整条断裂带发育的 9 处温泉为研究对象,通过分析水化学特征、气体组分和同位素特征,结合构造地质背景,研究该断裂带温泉流体地球化学特征及水热活动,并探讨地热地质意义,以期为该断裂带沿线温泉进一步勘探开发找寻思路。

1 地质条件

在长期的地质发展历程中,赣南地区在构造、沉积、岩浆作用等方面具有独特性。赣南地区位于江西省南部,大地构造上位于华夏板块,次级构造单元属

南岭东段隆起带^[17], 是江西省内构造活动最为强烈的地区(图 1)。断裂构造十分发育, 包括 NNE、NE 及 NW 向多组区域性深大断裂, 控制着沿线断陷盆地的发展和花岗岩体侵位。基底组成以震旦系~寒武系~奥陶系为主, 上古生界~下三叠统为坳陷区主要

沉积地层, 中~新生界为断陷盆地主要沉积地层。赣南地区岩浆岩十分发育, 广布全区, 分属于加里东期、印支期和燕山期, 各期次均有多次大规模侵入活动, 早期往往形成大规模岩基, 晚期通常以小规模岩株、岩瘤为主^[16]。

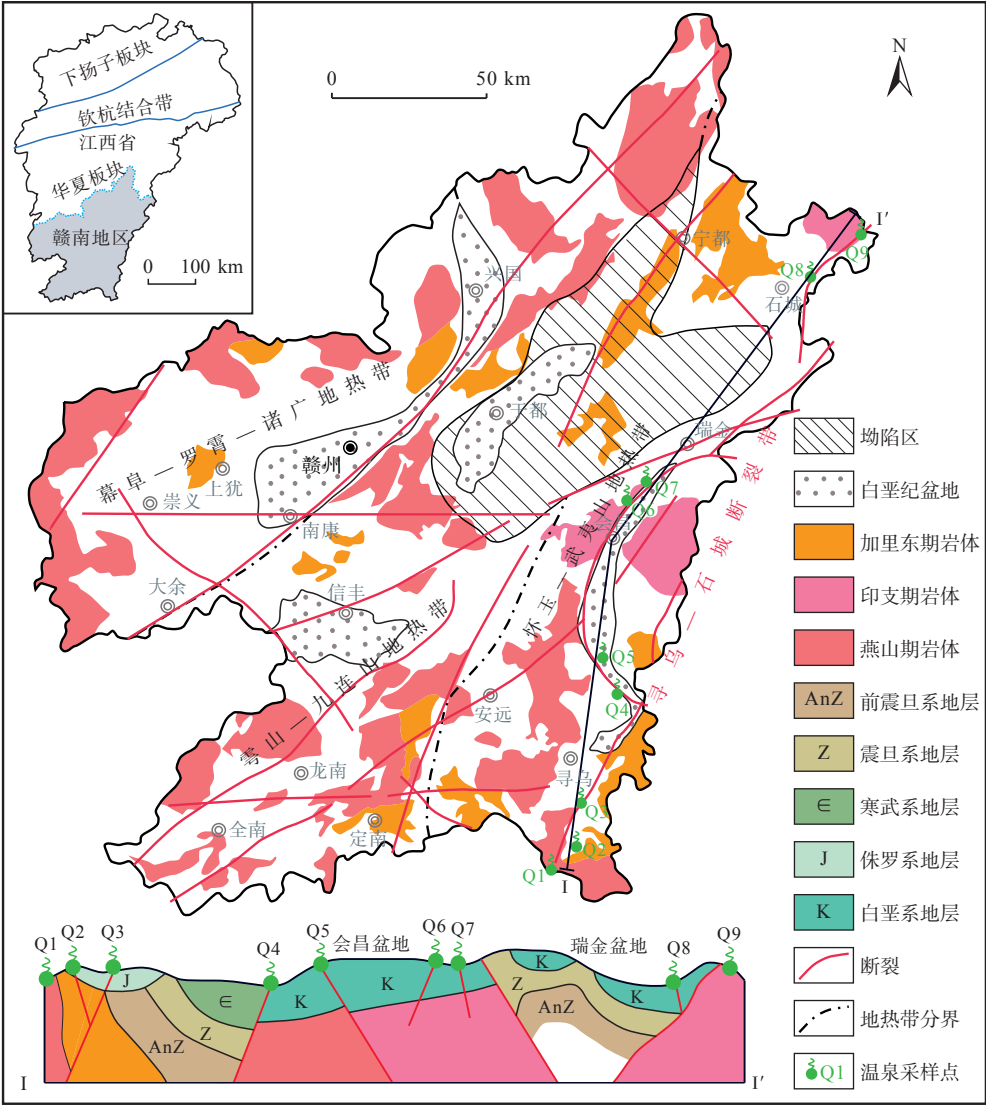


图 1 赣南地区地质构造及温泉分布简图 (据文献 [17] 改编)

Fig. 1 Geological structure and hot spring distribution in southern Jiangxi region (adapted from Ref. [17])

注: Q1 为吊神排温泉; Q2 为石牛湖温泉; Q3 为磷石背温泉; Q4 为上津温泉; Q5 为汉仙温泉; Q6 为谢坊温泉;
Q7 为龙门温泉; Q8 为上温寮温泉; Q9 为烧湖里温泉。

寻乌—石城断裂带是赣南地区东部发育的一条重要导热发震断裂带, 也是江西省内构造、地震活动最为显著的断裂带, 位于武夷山西麓, 南起赣粤边界, 向 NNE 经寻乌、会昌至石城一带, 江西省内延伸长度约 250 km, 大地构造上属北武夷隆起带, 形成于燕山后期。由一系列 NNE 向断层排列构成, 一般向 SEE 倾

斜, 倾角 $50^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 局部 45° 左右。沿线分布着加里东期片麻状花岗岩、印支期二云母花岗岩和燕山期花岗岩, 控制着沿线瑞金、会昌、寻乌等中生代红盆的分布和白垩系地层沉积。寻乌—石城断裂带地热温泉较为发育, 总体为低温地热资源, 热储岩性主要为花岗岩类^[22]。

2 采样和测试方法

2020 年 4 月,在赣南东部寻乌—石城断裂带沿线 9 处地热温泉点采集温泉水样和伴生气样,样品均在温泉天然泉眼或地热钻孔中采集,采样点位置见图 1。温泉水样采样容器为 500 mL 聚乙烯瓶,采样前用蒸馏水冲洗干净,现场再用待采样品润洗样品瓶 3~5 次。伴生气体样品采样容器为 100 mL 耐高温玻璃瓶,采用排水集气法收集气泡,瓶内保留一半容量饱和盐水用以防止气体溶解,用橡胶塞封口并在瓶口处进行蜡封,完成后倒置采样瓶。

温泉水温现场用温度计测定,水化学组分和同位素分析由江西省地质环境监测总站实验室完成。pH 值采用 ST50001 型离子计测定;水中阳离子采用 GGX-610 原子吸收分光光度计测定,测试精确度小于 0.5%;重碳酸根离子采用滴定法测定,检测仪器为 TU-1810PC 紫外可见分光光度计;其他阴离子采用离子色谱法测定,检测仪器为 ECO865 离子色谱仪;溶解性总固体(TDS)含量采用 JF2004 电子天平测定。水的氢氧稳定同位素采用 MAT-253 气体同位素质谱仪测定,同位素比值采用相对千分差表示,标准样品为 GISP,测试

精度 $\delta D \leq 2\%$, $\delta^{18}O \leq 0.2\%$ 。

温泉气体组分和同位素由中国科学院西北生态环境资源研究院地球化学分析测试中心完成。气体组分采用 GC9560 型气相色谱仪测定,检测依据为《天然气组成分析 气相色谱法》(GB/T 13610—2020),测试相对误差 $\leq 0.2\%$ 。氮同位素测试仪器为 Noblesse 型稀有气体同位素比值质谱仪,检测依据为《稀有气体同位素比值测定方法》(SY/T 7359—2017),测试误差在 $\pm 5\%$ 内。碳同位素采用 Delta Plus XP 型稳定同位素质谱仪,采用相对千分差表示,检测依据为《同位素组成质谱分析方法通则》(GB/T 37847—2019),标准样品(NG3)为高纯甲烷($-28.5\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$, V_{PDB}),检测精度 $\leq 0.5\text{‰}$ 。

3 结果

3.1 温泉水化学特征

3.1.1 水化学组成

研究区温泉水化学组成如图 1 所示, pH 值为 6.0~8.3, 平均为 7.3; TDS 含量为 240.3~2 217.8 mg/L, 平均为 993.9 mg/L, 总体为弱碱性低矿化度水。

表 1 寻乌—石城断裂带温泉水化学特征表

Table 1 Chemical characteristics of hot spring water in the Xunwu-Shicheng fault zone

编号	温度/℃	pH	质量浓度(ρ)/(mg·L ⁻¹)										$\delta^{18}O/\text{‰}$	$\delta D/\text{‰}$	水化学类型
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	H ₂ SiO ₃	TDS			
Q1	35.5	7.3	68.1	11.8	522.4	76.5	1 620.8	80.0	14.6	12.0	158.0	1 716.7	-6.7	-36.2	HCO ₃ —Na
Q2	51.0	8.3	14.9	4.0	98.0	23.0	250.7	24.0	14.4	15.0	156.0	443.0	-6.6	-43.2	HCO ₃ —Na
Q3	61.0	7.2	100.4	6.6	665.6	48.6	1 734.4	300.0	33.8	7.2	179.0	2 217.8	-6.5	-36.6	HCO ₃ —Na
Q4	40.0	8.2	37.1	1.8	210.0	43.2	568.5	80.0	12.8	12.0	104.0	768.9	-6.8	-41.6	HCO ₃ —Na
Q5	45.0	7.6	52.9	2.9	267.5	13.5	468.0	50.0	219.6	4.8	108.8	929.0	-7.2	-48.2	HCO ₃ ·Cl—Na
Q6	42.0	6.9	97.1	1.3	193.4	8.5	426.6	251.7	20.2	4.6	140.5	897.7	-6.9	-46.9	HCO ₃ ·SO ₄ —Na·Ca
Q7	34.0	6.0	132.3	17.5	290.0	34.0	795.2	337.6	19.7	6.0	83.0	1 244.8	-7.2	-47.8	HCO ₃ ·SO ₄ —Na·Ca
Q8	50.0	7.4	66.3	2.0	79.7	7.4	213.3	148.1	5.3	10.8	112.2	486.6	-6.4	-39.6	HCO ₃ ·SO ₄ —Na·Ca
Q9	39.0	6.9	14.4	1.5	35.0	8.0	70.6	40.0	9.6	6.0	117.0	240.3	-7.0	-41.9	HCO ₃ ·SO ₄ —Na·Ca

温泉水中阳离子以 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺为主,尤其以 Na⁺占主导地位,其次为 Ca²⁺。阴离子以 HCO₃⁻、SO₄²⁻、Cl⁻、F⁻为主, HCO₃⁻ 含量最高, SO₄²⁻ 次之。从主要离子浓度箱型图(图 2)也可以看出, Na⁺ 和 HCO₃⁻ 的浓度占据明显优势, Na⁺ 在所有阳离子中的质量浓度百分比达到 51%~81%, 平均为 68%; HCO₃⁻ 在所有阴离子中的质量浓度百分比达到 56%~94%, 平均为 72%。

温泉水中含有较高的偏硅酸(H₂SiO₃), 原因在于寻乌—石城断裂带沿线花岗岩体极为发育, 并且主要热储结构均位于花岗岩体内, 花岗岩作为酸性岩类,

其硅酸盐矿物含量高, 温泉水在地下循环过程中, 不断溶解花岗岩中的硅酸盐矿物, 使得温泉水具有较高的偏硅酸含量^[2]。

寻乌—石城断裂带从南(Q1)至北(Q9)(图 3), 温泉水中各主量离子浓度波动非常明显。HCO₃⁻、SO₄²⁻、Ca²⁺、Na⁺ 等 4 种离子具有相似的变化规律, Q1、Q3、Q7 号温泉均为上述离子浓度的高值点, 这与上述 3 处温泉所处的构造条件、热储结构及周边发育地层有关。Cl⁻ 浓度波动幅度较大, 主要在于 Q5 温泉点含有明显高于其他温泉水的 Cl⁻ 浓度, 高含量 Cl⁻ 可能与其

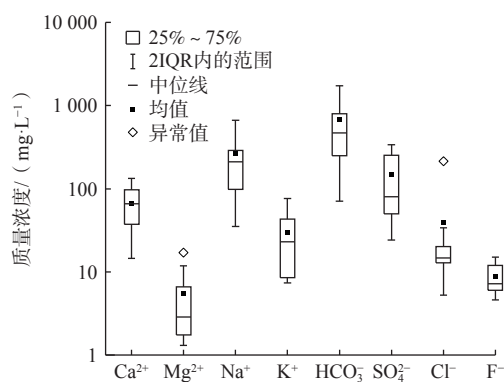


图2 主要离子质量浓度箱型图

Fig. 2 Box plot of major ion mass concentration

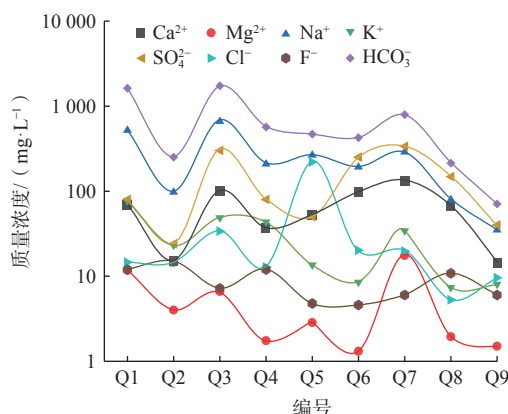


图3 主要离子浓度变化特征图

Fig. 3 Characteristics of changes in major ion concentration

北部发育的周田盐矿有关^[22]。

3.1.2 水化学类型

水化学类型是温泉水中主要化学组分的集中体现,本文采用舒卡列夫分类法(毫克当量百分数>25%的离子参与命名)对寻乌—石城断裂带温泉水化学类型进行分类^[23]。根据寻乌—石城断裂带温泉水样中主要离子组分 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ 、 HCO_3^{-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 等的质量浓度,采用 Origin 软件编制 Piper 三线图(图4)。

寻乌—石城断裂带温泉水化学类型可划分为 A 类、B 类、C 类三类。A 类型温泉水属 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型,共有 4 处温泉属于该类型水,位于会昌以北至石城一线,主量离子中 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 的异常成因与该类型温泉所处地层条件有关,主要位于白垩纪红盆附近,红盆在最大湖泛期通常为盐湖相沉积,形成石膏或芒硝等矿物^[21],石膏主要化学成分为 CaSO_4 ,芒硝主要化学成分为 Na_2SO_4 ,地下水循环过程中溶解上述矿物产生高含量 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 。B 类温泉水属 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 型水,也有 4 处温泉属于该类,分布于会昌南部至寻乌一线,该类温泉主要发育于花岗岩区或紧靠深大断裂

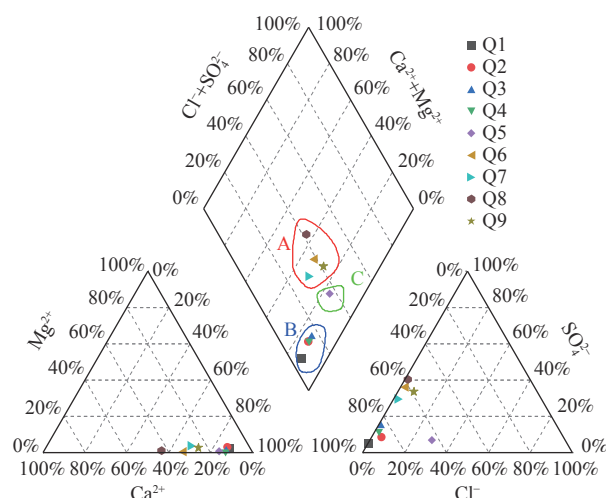


图4 寻乌—石城断裂带温泉水体 Piper 三线图

Fig. 4 Piper diagram of hot spring water in the Xunwu-Shicheng fault zone

带,高含量 HCO_3^{-} 与深部幔源流体上涌有关,而 Na^{+} 的形成与岩浆岩中钠长石等矿物溶解密切相关。C 类温泉水属 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl—Na}$ 型,仅有 1 个温泉属该类,位于会昌筠门岭镇,靠近周田盐矿是 Cl^{-} 异常高浓度的主要原因。

从构造位置看,寻乌—石城断裂带温泉水化学组成同温泉所属构造位置紧密相关,断裂带南北方向上水化学组成有较为显著的差异。A、B、C 三类温泉水具有明显分带性,A 类型位于研究区寻乌—石城断裂带北部,B 类型主要位于研究区南部,C 类型水由于靠近周田盐矿而产生 Cl^{-} 异常。

3.2 温泉气体化学特征

伴生气体是温泉流体中的重要组成部分,研究气体组分特征是识别其来源的基础。从表2中气体组分占比测试结果可知,寻乌—石城断裂带温泉气体组分主要由 CO_2 、 CH_4 、 N_2 、 O_2 、Ar 和 He 等组成。 CO_2 和 N_2 是寻乌—石城断裂带温泉气体最主要的组成部分, CO_2 的体积占比为 0.44%~93.45%, N_2 的体积占比为 5.44%~96.75%。除 CO_2 和 N_2 之外,其他气体组分占比较小,普遍在 10% 以下。 N_2 作为温泉气体中的常见主量组分,在中低温地热温泉系统中,高含量 N_2 通常指示相对封闭的地热流体循环系统,而高含量 CO_2 则多在活动构造环境下的地热系统中存在。

根据寻乌—石城断裂带温泉气体组分特征,可将温泉气体类型划分为两类: CO_2 型和 N_2 型(图5)。 CO_2 型温泉气体包括吊神排温泉(Q1)、磷石背温泉(Q3)和龙门温泉(Q7),是以 CO_2 为主要气体组分的温泉,

表 2 寻乌—石城断裂带温泉气体组分和同位素组成

Table 2 Hot spring gas and isotope compositions in the Xunwu-Shicheng fault zone

编号	温泉	气体组分体积分数(φ)/%						$^3\text{He}/^4\text{He}$	R/Ra	$\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}/\text{‰}$
		CO_2	CH_4	N_2	O_2	Ar	He			
Q1	吊神排温泉	93.45	0.01	5.44	1.03	0.06	0.01	4.22×10^{-6}	3.01	-5.8
Q2	石牛湖温泉	0.44	0.03	96.75	0.83	1.31	0.64	9.71×10^{-7}	0.69	—
Q3	磷石背温泉	91.64	0	6.65	1.62	0.08	0.01	2.95×10^{-6}	2.10	-6.1
Q4	上津温泉	4.44	0.16	93.05	0.31	1.20	0.84	1.22×10^{-6}	0.87	—
Q5	汉仙温泉	0.76	0.23	96.02	1.40	1.38	0.21	1.04×10^{-6}	0.74	—
Q6	谢坊温泉	9.16	0.37	88.10	0.28	0.97	1.12	1.10×10^{-6}	0.79	-12.4
Q7	龙门温泉	85.29	0.08	12.11	2.23	0.26	0.02	3.51×10^{-6}	2.51	-6.9
Q8	上温泉	19.15	0	75.17	4.06	1.08	0.54	8.06×10^{-7}	0.58	-11.8
Q9	烧湖里温泉	4.33	0	86.85	7.47	1.21	0.14	1.42×10^{-6}	1.02	—

注: R/Ra 表示氮同位素值(R)和空气氮同位素值(Ra)的比值。

CO_2 含量均在 85% 以上; N_2 型温泉气体占据多数, 共有 6 处, N_2 含量在 75.17% ~ 96.75%。

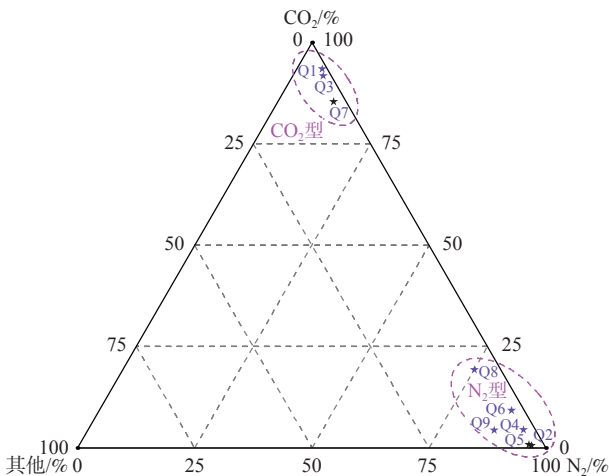


图 5 寻乌—石城断裂带温泉气体组分三角图
Fig. 5 Triangle diagram of hot spring gas composition in the Xunwu-Shicheng fault zone

4 分析与讨论

4.1 温泉水

4.1.1 温泉水来源

前人研究表明, 氢氧稳定同位素在研究热水成因来源方面应用广泛, 稳定氢氧同位素特征记录了温泉水的起源及其形成过程的重要信息, 通过对温泉水氢氧同位素的分析, 可以为地热温泉水资源的精确评价和进一步开发利用和研究奠定基础^[24-25]。Craig^[24]最早在 1961 年提出基于氢氧稳定同位素的全球降水线公式为 $\delta\text{D}=8\delta^{18}\text{O}+10$, 郑淑蕙等^[26]采用最小二乘法求得我国的降水线公式为 $\delta\text{D}=7.9\delta^{18}\text{O}+8.2$, 孙占学等^[27]基于赣南寻乌横迳地区冷水泉氢氧同位素数据, 推导

得出该区大气降水线方程为 $\delta\text{D}=8.33\delta^{18}\text{O}+8.52$ 。

大气降水成因形成的温泉水, 其氢氧同位素组成与大气降水具有类似特征^[28]。如果 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系曲线上出现偏离现象, 则可能是水-岩反应或者水-气作用所造成的同位素分馏效应^[29]。通过绘制中国大气降水线^[26]、寻乌大气降水线^[27], 分析本文研究的 9 处温泉点水样在 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系曲线图上的位置, 可以判断温泉水来源。

寻乌—石城断裂带温泉水 δD 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 $-48.2\text{‰} \sim -36.2\text{‰}$ 和 $-7.2\text{‰} \sim -6.5\text{‰}$, 氢氧同位素值变化范围不大。据图 6 可知, 对比中国大气降水线和寻乌地区降水线, 寻乌—石城断裂带温泉水的氢氧同位素值均在两条大气降水线附近, 表明该断裂带温泉水主要来源于附近的大气降水。部分温泉水氢氧同位素值存在向左偏移的现象, 表现出氧同位素负漂移的特征, 以吊神排温泉(Q1)和磷石背温泉(Q3)最为突出。进一步分析研究发现, Q1 和 Q3 号温泉水中具有

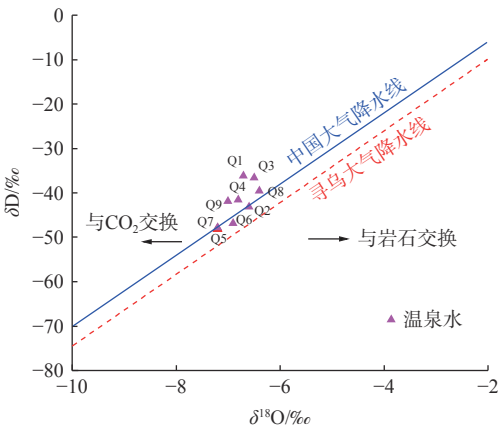


图 6 寻乌—石城断裂带温泉水 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 关系图
Fig. 6 Relationship of δD and $\delta^{18}\text{O}$ in the hot spring water in the Xunwu-Shicheng fault zone

高 HCO_3^- , 在水离子浓度箱型图(图 2)中为异常高值点, 异常高 HCO_3^- 主要是由于温泉伴生气中含有的大量 CO_2 气体溶解在水中造成。有关研究表明, 当温泉流体中 CO_2 气体相对于温泉水体占据主导地位时, 同位素交换作用下会引起温泉水中氧同位素的负向漂移^[30]。因此, 上述两处温泉点地热水在循环过程中, 与伴生气体中 CO_2 发生了水气相互作用, 产生了同位素交换, 并最终造成 $\delta^{18}\text{O}$ 的负向漂移。

4.1.2 补给高程

大气降水中的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 具有高程效应, 会随着地区高程的升高而降低, 且不同地区高程效应差别较大。通常, 高程每增高 100 m, δD 值减少 1‰ ~ 4‰, $\delta^{18}\text{O}$ 值减少 0.15‰ ~ 0.5‰^[31]。利用氢氧同位素的高程效应来估算温泉地热水的补给高程, 是目前常用的研究手段。具体的计算公式如下:

$$H = \frac{\delta Y - \delta P}{K} + h \tag{1}$$

式中: H ——温泉水补给区高程/m;
 δY ——温泉水样 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值/‰;
 δP ——大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值/‰, 采用寻乌地区降水同位素值^[18];
 K ——氢氧同位素高程效应梯度值, δD 取 25‰/km, $\delta^{18}\text{O}$ 取 3.0‰/km;
 h ——温泉水出露高程/m。

通过计算, 寻乌—石城断裂带沿线温泉水补给高程为 537 ~ 867 m(表 3)。研究区地处华夏板块南岭东段造山带, 以丘陵地貌为主, 温泉多发育在山间沟谷地段。结合温泉水来源和断裂带发育情况分析认为, 温泉水补给区应为寻乌—石城断裂带沿线发育的中低山脉, 海拔一般为 500 ~ 1 200 m, 大气降水经断裂带渗入至热储结构后, 循环增温形成温泉。

表 3 寻乌—石城断裂带温泉水补给高程

Table 3 Elevation of hot spring water recharge in the Xunwu-Shicheng fault zone

编号	温泉高程/m	$\delta^{18}\text{O}$ 计算高程/m	δD 计算高程/m	平均高程/m
Q1	237	834	301	567
Q2	267	830	611	721
Q3	232	762	312	537
Q4	240	870	520	695
Q5	213	976	757	867
Q6	180	843	672	758
Q7	211	974	739	857
Q8	343	840	543	691
Q9	280	977	572	774

4.1.3 热储温度

热储温度是研究温泉水成因类型和评价温泉资源勘探开发潜力的关键参数, 地球化学温标是对流型温泉热储温度估算的主要手段^[21]。目前关于计算温泉热储结构温度的主要有阳离子温标、硅温标、气体地热温标等定量地球化学温标^[31]。运用地球化学温标进行热储温度估算前, 应对温泉水与矿物的水岩作用平衡状态进行判断。通过 Na-K-Mg 三角图解可以判断温泉水岩反应的平衡状态, 进而针对热储温度采用合适的温标进行估算^[32]。

从图 7 可知, 寻乌—石城断裂带所有温泉水均分布在未成熟水区域, 靠近图中 $\sqrt{\text{Mg}}$ 一侧, 表明该断裂带地热系统中温泉水与原岩的水岩作用未达到平衡状态, 可能是温泉水上升过程中混入较多的浅层水, 所以采用阳离子温标不能准确进行热储温度估算, 本文采用二氧化硅温标进行估算, 包括石英温标和玉髓温标。二氧化硅温标的理论依据是地热水在不同压力、温度条件下对 SiO_2 具有不同的溶解度^[28], 因此可通过 SiO_2 含量对热储温度进行预测。

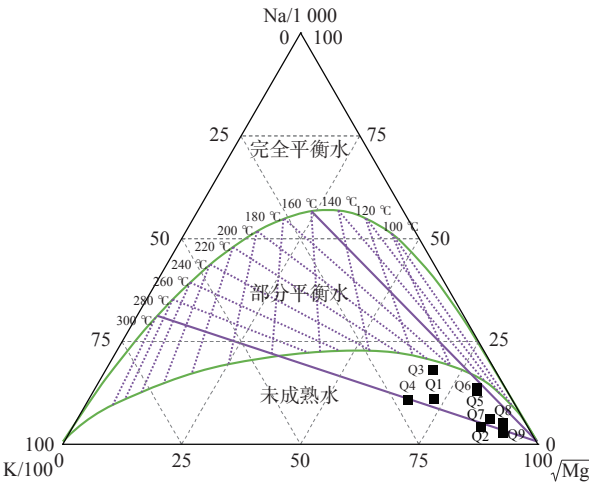


图 7 寻乌—石城断裂带温泉水 Na-K-Mg 三角图

Fig. 7 Na-K-Mg ternary diagram of hot spring water in the Xunwu-Shicheng fault zone

寻乌—石城断裂带发育温泉主要为低温地热资源, 温泉水到达井口或泉眼时未达到沸腾状态、无蒸汽损失, 采用无蒸汽损失的石英温标和玉髓温标, 能够较为准确估算热储温度^[28, 33]。计算公式如下:

石英温标-无蒸汽损失(0 ~ 250 °C):

$$T = \frac{1\,309}{5.19 - \lg C} - 273.15 \tag{2}$$

玉髓温标-无蒸汽损失(0 ~ 250 °C):

$$T = \frac{1032}{4.69 - \lg C} - 273.15 \quad (3)$$

式中: C ——温泉水中 SiO_2 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

据石英温标和玉髓温标估算结果取平均值, 寻乌—石城断裂带温泉热储温度为 $99 \sim 143^\circ\text{C}$ (表 4), 属于中温热储。而根据 Na-K-Mg 三角图(图 7)可知, 寻乌—石城断裂带温泉基本位于 $160 \sim 300^\circ\text{C}$ 等温线之间, 通过硅温标估算的热储温度均明显低于该范围, 更符合研究区的低温地热资源条件。

表 4 寻乌—石城断裂带温泉水硅温标计算结果表
Table 4 Calculation results of hot spring water silicon geothermometer in the Xunwu-Shicheng Fault Zone

编号	SiO_2 含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	石英温标/ $^\circ\text{C}$	玉髓温标/ $^\circ\text{C}$	平均温度/ $^\circ\text{C}$
Q1	121.54	148.39	122.97	135.68
Q2	120.00	147.64	122.13	134.88
Q3	137.67	155.87	131.37	143.62
Q4	80.00	125.10	97.15	111.12
Q5	83.68	127.48	99.76	113.62
Q6	108.04	141.56	115.34	128.45
Q7	63.85	113.57	84.58	99.08
Q8	86.28	129.11	101.56	115.34
Q9	90.00	131.39	104.08	117.73

4.2 气体成因分析

He 和 CO_2 是温泉气体的重要组成部分, 蕴含有丰富的地质和地球化学信息, 通过对二者的稳定同位素分析, 能够获得气体成因的有效信息, 从而实现对气体来源的判定^[34]。

4.2.1 He 的成因

He 是一种稀有气体, 在自然界中的稳定同位素只有 ^3He 和 ^4He ^[17, 35]。 ^3He 和 ^4He 分别代表不同的成因来源, ^3He 是地球形成初期赋存于地幔中的原始气体, 而 ^4He 则认为是地壳岩石中放射性元素衰变生成的^[17], 二者成因差别很大, 因此通过稳定同位素分析能够准确判断温泉流体中 He 的来源, 进而可以对区域内导热构造条件与性质进行分析研究^[36]。 氦同位素特征用 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 表示, 由于大气中的 He 含量少且同位素组成稳定, 其 $^3\text{He}/^4\text{He}=1.4 \times 10^{-6}$ 的同位素值保持基本恒定, 为了便于识别, 一般也采用样品氦同位素值(R)和空气氦同位素值(Ra)的比值(R/Ra)来表示氦同位素组成特征。 前人研究认为^[37-38], 当 $R/Ra > 1$ 时, 代表样品中来自地幔的 He 份额占比大于 12%; 当 $R/Ra > 0.1$ 时, 代表幔源 He 份额占比大于 1.2%; 当 $R/Ra < 0.1$ 时, 一般就认为 He 基本来自地壳岩石。

据表 2 可知, 寻乌—石城断裂带温泉气体中普遍

含有 He 组分, 体积分数为 0.01% ~ 1.12%。 氦同位素 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为 $8.67 \times 10^{-7} \sim 4.22 \times 10^{-6}$, 对应的 R/Ra 值为 0.58 ~ 3.01, 平均为 1.37。 根据氦同位素值测试结果, 可以初步判断寻乌—石城断裂带温泉气体中 He 有一定份额为地幔成因。 关于 He 地幔成因和地壳成因的占比份额, 可以通过二元复合模式公式计算得出^[17, 38]。 经计算, 寻乌—石城断裂带温泉气体中 He 的地幔成因来源占比为 7.16% ~ 38.25%, 平均为 17.26%; 相应的来自于地壳岩石放射性成因的 He 占比份额为 61.75% ~ 92.84%, 平均为 82.63%。

综上, 寻乌—石城断裂带温泉气体中, He 以地壳成因为主, 地幔成因为辅, 总体表现为壳幔复合成因。 寻乌—石城断裂带是江西省内构造活动性最强、地震最频繁断裂, 控制着沿线白垩纪红盆的发育和分布, 新近纪以来仍具备活动性, 重力、航磁异常解释为切穿地壳、沟通地幔的深大断裂^[16], 形成幔源流体上升通道, 是造成该断裂带温泉气体中具有幔源成因 He 的主要原因。

4.2.2 CO_2 的成因

温泉气体中 CO_2 的碳同位素组成含有丰富的地球化学信息^[39], 而不同成因的 CO_2 具有不同的分馏效应, 稳定碳同位素组成特征是揭示 CO_2 成因的重要手段。 宋岩等^[40]研究发现, 无机成因来源 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般大于 -8‰ , 主要介于 $-8\text{‰} \sim 3\text{‰}$ 之间, 无机成因 CO_2 又可进一步分为碳酸盐岩成因和幔源-岩浆成因, 前者同位素组成较重, 为 $0 \sim 3\text{‰}$, 后者一般为 $-8\text{‰} \sim 2\text{‰}$; 有机成因来源 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值一般小于 -10‰ ; 而 $-10\text{‰} \sim -8\text{‰}$ 区间为有机和无机成因 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值重叠区域, 为混合成因。 据表 2 测试结果可知, 寻乌—石城断裂带温泉气体 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值为 $-12.4\text{‰} \sim -5.8\text{‰}$ 。 根据上述判别机制, 研究区温泉气体 CO_2 成因包括无机和有机成因两类。 吊神排温泉(Q1)、磷石背温泉(Q3)和龙门温泉(Q7)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值大于 -8‰ , 为无机成因; 谢坊温泉(Q6)、上温寮温泉(Q8)的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 值小于 -10‰ , 为有机成因。

温泉气体中不同来源 CO_2 的同位素会发生重叠, 仅通过 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 难以解析其具体来源, Sano 等^[41]提出通过 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{^3\text{He}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 的关系来对 CO_2 的成因进行精确解析。 在 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{^3\text{He}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 的相对关系图解中, 有 3 个异常解释端元, 分别代表 CO_2 气体的幔源、灰岩和沉积有机质成因, 三类成因的气体中 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{^3\text{He}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 数值有明显的差别。 根据本次研究测试获取的气体组分和氦同位素数据, 经计算得出寻乌—石城断

裂带 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}$ 比值为 $7.08 \times 10^5 \sim 5.18 \times 10^9$ 。共测试获取了 5 个温泉气体的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 数值,其中吊神排温泉(Q1)、磷石背温泉(Q3)和龙门温泉(Q7)是以 CO_2 为主要组分的气体,谢坊温泉(Q6)、上温寮温泉(Q8)气体中 CO_2 组分含量较少,采用该图解分析可能带来较大误差^[9,42]。因此,采用 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 图解对 3 个气体组分以 CO_2 为主的温泉气体进一步分析(图 8),可见这 3 个温泉气体均分布在幔源端元附近,而研究区自新生代以来并无岩浆活动迹象,表明温泉气体中的 CO_2 均主要来自于地幔脱气作用,寻乌—石城断裂带沟通地幔是导致这一现象的直接原因。

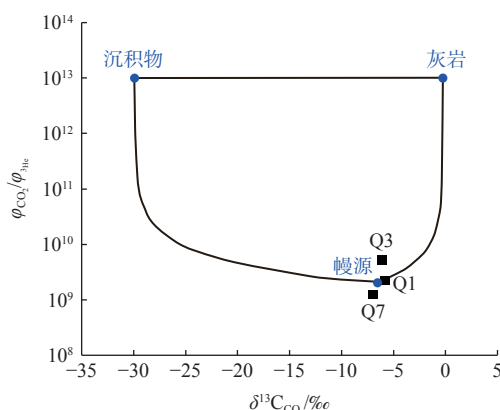


图 8 寻乌—石城断裂带温泉气体 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ 关系图

Fig. 8 Relationship of $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}-\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$ in Xunwu—Shicheng fault zone of hot spring gas

注: 幔源 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}=2 \times 10^9$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}=-6.5\text{‰}$; 灰岩 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}=1 \times 10^{13}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}=0\text{‰}$; 沉积物 $\varphi_{\text{CO}_2}/\varphi_{\text{He}}=1 \times 10^{13}$, $\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}=-30\text{‰}$ 。
底图据 Sano 等^[41] 修改。

综合上述讨论可知,寻乌—石城断裂带沿线温泉气体中 CO_2 的成因主要有两类:无机成因和有机成因。无机成因 CO_2 是地幔脱气经断裂带上涌,从温泉中溢出;有机成因 CO_2 推测可能来自于浅部地壳覆盖层或大气降水中的有机组分,随地下水循环导入温泉流体而形成。

4.2.3 幔源组分的成因联系

根据前文讨论可知,寻乌—石城断裂带温泉流体中释放的 CO_2 、 He 气体,通过同位素证据的鉴别,均有深源(地幔)和浅源(地壳)成因。对温泉气体氦同位素(R/Ra)与碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)进一步分析,SPSS 软件分析显示二者相关性系数达到 0.85,表明具有较为明显的相关性。将 5 件样品的氦同位素(R/Ra)与碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)绘制于同一坐标轴下(图 9),发现氦同位素值与碳同位素值具有明显正相关关系。

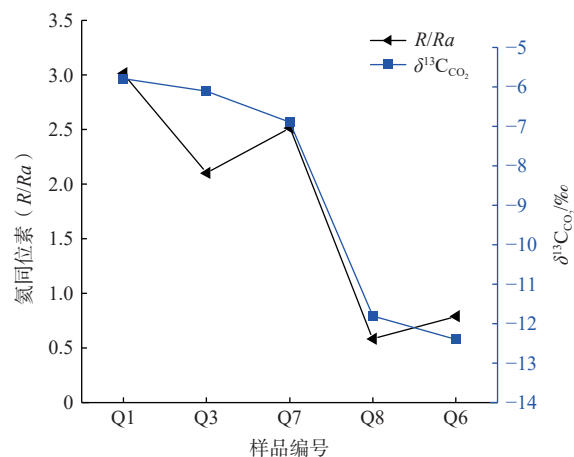


图 9 寻乌—石城断裂带温泉气体氦同位素 (R/Ra) 与碳同位素 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) 相关性

Fig. 9 Correlation between Helium Isotopes (R/Ra) and Carbon Isotopes ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$) in the hot spring gas in the Xunwu—Shicheng fault zone

吊神排温泉(Q1)、磷石背温泉(Q3)、龙门温泉(Q7)具有较高的碳同位素值,显示出 CO_2 为无机幔源成因,对应的温泉气体中氦同位素(R/Ra)为 2.1 ~ 3.01,计算得出 He 中幔源组分占比达到 26.68% ~ 38.25%。上温寮温泉(Q8)和谢坊温泉(Q6)碳同位素值较小, CO_2 主要为浅部地层有机成因,而对应的氦同位素值为 0.58 ~ 0.79, He 中的幔源组分占比仅有 7.16% ~ 9.84%。

碳同位素和氦同位素的成因解译结果表明,寻乌—石城断裂带具有显著的深源流体释放特征, CO_2 和幔源 He 气体在成因来源上有着密切联系,二者在成因来源上具有相互依存的关系。本次研究温泉均发育于寻乌—石城断裂带沿线,但由于断裂带各处构造条件有所不同, Q1、Q3、Q7 温泉所处的断裂区段对地幔沟通能力较强,使得大量幔源无机 CO_2 和 ^3He 通过断裂带进入温泉流体中涌出地表,在快速上升过程中未受到地壳流体的混染,保留了幔源流体同位素特征,并且泉眼或地热井中表现出大量喷气现象。这种独特的幔源气体异常释放现象,与我国滇西北^[43]、藏南^[44]、东北五大连池^[45]等地区温泉气体释放具有相似特征,活动性断裂构造发育是产生这一现象的主因。

4.3 温泉流体变化特征及其地质意义

综合本次研究所获得的温泉流体地球化学参数,并结合温泉位置、热储温度以及断裂带附近地震活动等资料,绘制了寻乌—石城断裂带温泉位置、热储温度、TDS、 HCO_3^- 、 CO_2 、 R/Ra 、幔源氦和地震震级关系图(图 10)。

研究区内温泉沿断裂带分布,温泉发育的热储温

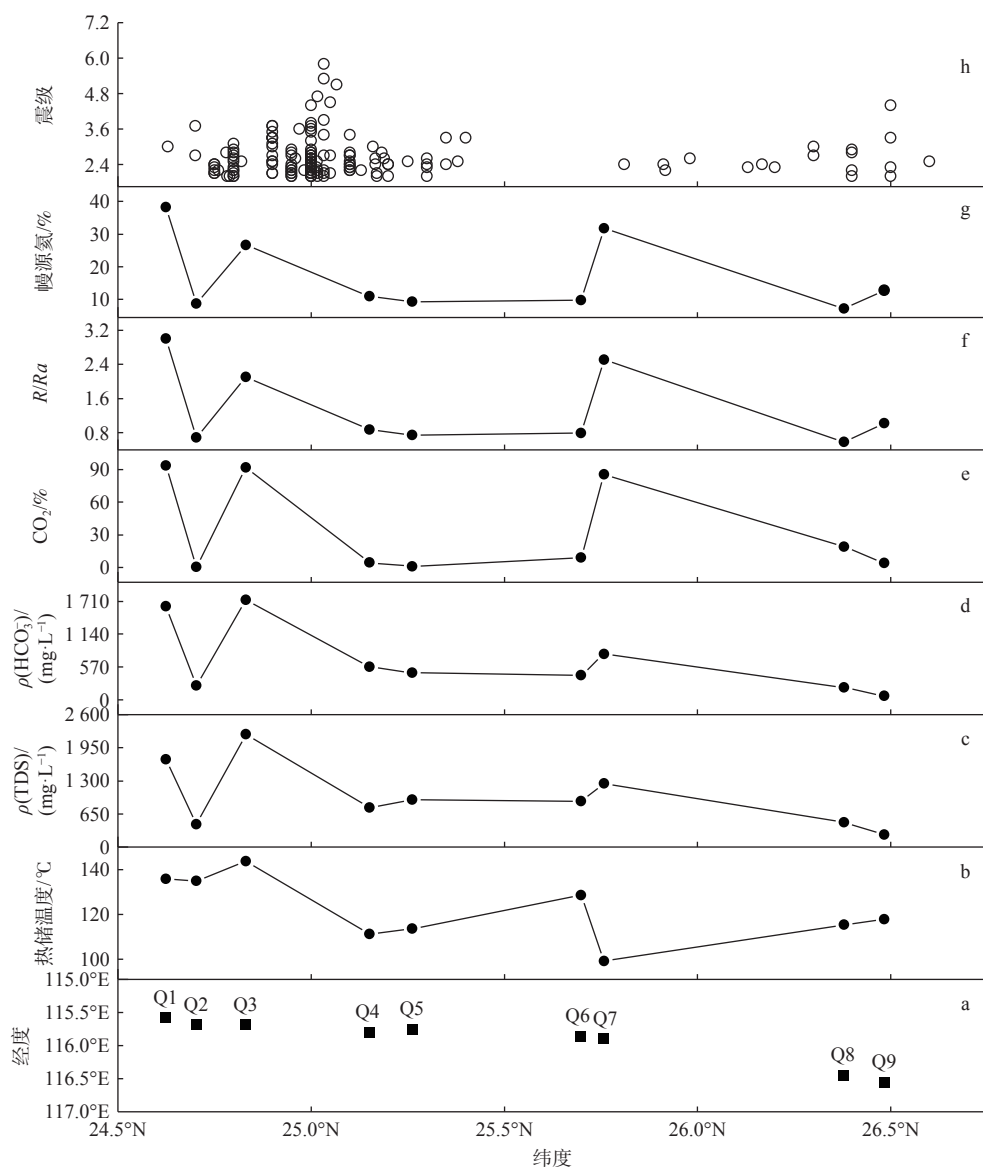


图 10 寻乌—石城断裂带温泉位置 (a) 与热储温度 (b)、TDS (c)、 HCO_3^- (d)、 CO_2 (e)、 R/Ra (f)、幔源氦 (g) 和地震震级 (h) 关系图

Fig. 10 Location of the hot springs in the Xunwu-Shicheng fault zone (a) and its relationship with thermal storage temperature (b), TDS (c), HCO_3^- (d), CO_2 (e), R/Ra (f), mantle source helium (g), and earthquake magnitude (h)

度与地质条件、构造活动性具有密切关系。从图 10b 可知, 位于断裂带南部的 Q1、Q2、Q3 是热储温度最高的温泉, 该区域具有多期岩浆活动, 加里东期、燕山期岩体十分发育, 同时伴有较为强烈的构造活动, 具有显著的深部流体上涌特征。花岗岩体放射性生热叠加深部热流供给, 是这一区域孕育较高温度热储的重要原因。

据图 10c、图 10d, 温泉水中 TDS 含量与 HCO_3^- 在空间变化上具有基本一致的规律, 在 Q1、Q3、Q7 温泉处为峰值, 其他温泉的变化幅度相对较小。主要原因在于地下热水在对流循环的过程中, 汇入了从深部地

幔上涌的 CO_2 气体, 在随温泉水运移至地表的过程中, CO_2 气体不断溶解在温泉水中或与地下原岩中硅酸盐矿物发生水-岩反应, 最终导致温泉水中的 HCO_3^- 异常升高^[34]。因此从图 10d、图 10e 可以明显看出, CO_2 与 HCO_3^- 具有完全一致的空间变化趋势, 表明温泉水中 HCO_3^- 受 CO_2 气体影响巨大, 并且 HCO_3^- 作为温泉水化学组成中的主量组分, 也进一步影响了 TDS 的高低。

CO_2 为温泉气体中主量组分之一, He 也在温泉气体中普遍存在, 同位素证据显示二者成因来源关系密切, 图 10e—g 表明, CO_2 含量与氦同位素、幔源氦组分占比在空间变化上的一致性规律, Q1、Q3、Q7 温泉为

上述参数的峰值点,代表深源组分的最大来源区域,表明寻乌—石城断裂带在这些区域具有更好的沟通深部地幔的能力。学者通过对温泉流体研究提出,深源 He 和 CO₂ 气体是构造和地震活动性强弱的重要地球化学指示标志^[46]。通过图 10e、图 10h 对比分析可知,研究区温泉地幔流体与地震发生频度之间存在明显依存关系,地幔流体含量高的温泉所在区域地震发生频率也较高。断裂带南部地震发生率明显高于北部,这种地震发生频率的分布特征与断裂带南部幔源流体高于北部的特征也是一致的,说明在断裂带南部构造活动更为频繁且强烈。寻乌—石城断裂带南部寻乌地区处于多向断裂构造交接复合部位,在构造应力集中作用下,构造活动频繁,深部能量以地震、温泉等形式释放,形成地震频度、强度高异常区,并伴有深部 CO₂、He 气体的上涌,最终形成地幔流体异常释放现象。深部流体在断裂带循环、运移过程中,流体与岩石发生的物理化学作用也会改变断层的活动状态^[47],进而影响断裂带的构造稳定性。综合以上分析认为,寻乌—石城断裂带南段岩浆岩分布密集、构造活动性强烈、幔源流体上涌区域,是探寻中高温地热资源的有利区。

5 结论

(1)寻乌—石城断裂带发育 3 类温泉水,以 A 类 HCO₃·SO₄—Na·Ca 型水和 B 类 HCO₃—Na 型水为主, A 类分布于研究区南部, B 类分布于北部。氢氧稳定同位素结果指示温泉水来源当地大气降水,部分泉点 δ¹⁸O 的负向漂移现象为 CO₂ 与水发生水气相互作用的结果,温泉水补给区为断裂带沿线山脉。研究区温泉均为水岩作用未达到平衡状态的未成熟水,估算热储温度范围介于 99~143℃。

(2)寻乌—石城断裂带温泉气体划分为 2 类: N₂ 型和 CO₂ 型气体。同位素分析显示温泉气体中 He 为地壳成因为主、地幔成因为辅的壳幔复合成因; CO₂ 成因包括无机成因和有机成因,无机成因 CO₂ 为地幔脱气的结果。碳同位素和氦同位素的成因解译结果表明,无机 CO₂ 和幔源 He 在成因来源上具有相互依存的关系。

(3)地幔深源流体异常释放作用下,温泉中热储温度、TDS、HCO₃⁻、CO₂、R/Ra、幔源氦占比等参数具有较为相似的空间分布规律,与寻乌—石城断裂带构造和地震活动性有较好的对应关系,深部流体释放和断裂带构造、地震活动性具有相互促进作用。

参考文献 (References):

- [1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-459.[WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449-459. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 袁星芳,王敬,霍光,等.胶东半岛洪水崮汤泉水化学特征与成因分析[J].地质与勘探,2020,56(2):427-437.[YUAN Xingfang, WANG Jing, HUO Guang, et al. Hydrochemistry and genesis of the Hongshuilantang hot spring in the Jiaodong Peninsula[J]. Geology and Exploration, 2020, 56(2): 427-437. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 崔洋,康凤新,钟振楠,等.鲁西北平原地热热源机制的气体同位素约束[J].地球学报,2023,44(1):93-106.[CUI Yang, KANG Fengxin, ZHONG Zhennan, et al. Gas isotope constraints on the geothermal heat source mechanism in Northwest Shandong Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2023, 44(1): 93-106. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 何亚东,贾小丰,张自宾,等.阳高—天镇地区高温地热系统形成机制及资源开发前景研究[J].水文地质工程地质,2023,50(4):39-49.[HE Yadong, JIA Xiaofeng, ZHANG Zibin, et al. A study of the formation mechanism and resource development prospect of the hightemperature geothermal system in the Yanggao-Tianzhen area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 39-49. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王云.滇东南地热流体地球化学特征研究[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2021.[WANG Yun. A research on geochemical characteristics of geothermal fluids in Southeast Yunnan Province, China[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 谭梦如,周训,张彧齐,等.云南勐海县勐阿街温泉水化学和同位素特征及成因[J].水文地质工程地质,2019,46(3):70-80.[TAN Mengru, ZHOU Xun, ZHANG Yuqi, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the Mengajie hot spring in Menghai county of Yunnan[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(3): 70-80. (in Chinese with English abstract)]
- [7] LIU Chunlei, LU Chenming, LI Yasong, et al. Genetic

- model and exploration target area of geothermal resources in Hongtang Area, Xiamen, China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022, 10(2): 128 – 137.
- [8] 周晓成, 王万丽, 李立武, 等. 金沙江—红河断裂带温泉气体地球化学特征 [J]. 岩石学报, 2020, 36(7): 2197 – 2214. [ZHOU Xiaocheng, WANG Wanli, LI Liwu, et al. Geochemical features of hot spring gases in the Jinshajiang-Red River fault zone, Southeast Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 2020, 36(7): 2197 – 2214. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 天娇, 李义曼, 范翼帆, 等. 广东神灶海上温泉的流体地球化学特征及循环模式 [J]. 地球科学, 2023, 48(3): 894 – 907. [TIAN Jiao, LI Yiman, FAN Yifan, et al. Geochemical characteristics and circulation conceptual model of geothermal fluid in the Shenzao coastal hot springs in Guangdong Province[J]. Earth Science, 2023, 48(3): 894 – 907. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李义曼, 罗霁, 陈凯, 等. 广东省丰良地热田高氟地热流体成因及热储温度评价 [J]. 地质论评, 2023, 69(4): 1337 – 1348. [LI Yiman, LUO Ji, CHEN Kai, et al. Genesis of geothermal fluid with high fluorine content and reservoir temperature assessment in Fengliang geothermal field, eastern Guangdong[J]. Geological Review, 2023, 69(4): 1337 – 1348. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 江西省地质矿产勘查开发局. 江西省环境地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017. [Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Jiangxi Province. Environmental geology records of Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [12] 庞菊梅, 王英男, 金爱芳, 等. 承德北部茅荆坝地热田地热流体的水化学和同位素特征及其成因 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 224 – 236. [PANG Jumei, WANG Yingnan, JIN Aifang, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics and genesis of geothermal fluids in the Maojingba geothermal field, northern Chengde city[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 224 – 236. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王安东, 孙占学, 蔺文静, 等. 江西省地热资源赋存特征及潜力评价 [J]. 中国地质, 2023, 50(6): 1646 – 1654. [WANG Andong, SUN Zhanxue, LIN Wenjing, et al. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment of Jiangxi Province[J]. Geology in China, 2023, 50(6): 1646 – 1654. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 郑乾墙, 钟鸣, 邓有平. 江西地热控制因素研究 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2009, 32(3): 261 – 264. [ZHENG Qianqiang, ZHONG Ming, DENG Youping. Control factors of geothermy in Jiangxi Province[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2009, 32(3): 261 – 264. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 夏中智, 马振兴, 王先广, 等. 江西省地勘基金地热勘查新进展 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 71 – 78. [XIA Zhongzhi, MA Zhenxing, WANG Xianguang, et al. Progress of the geothermal exploration projects sponsored by Jiangxi administration fund for geological exploration[J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2017, 40(1): 71 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 江西省地质矿产勘查开发局. 中国区域地质志·江西志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017. [Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Jiangxi Province. Regional geology of China Jiangxi Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [17] 隋丽媛, 周训, 李状, 等. 安徽滁河断裂带温泉的水化学和同位素特征及成因分析 [J]. 地质论评, 2022, 68(3): 981 – 992. [SUI Liai, ZHOU Xun, LI Zhuang, et al. Hydrochemical and isotopic characteristics and genesis of hot springs in the Chuhe fault zone, Anhui[J]. Geological Review, 2022, 68(3): 981 – 992. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 欧晓斌, 鲍志诚, 吕坚, 等. 全南—寻乌断裂带温泉水文地球化学特征 [J]. 地震研究, 2023, 46(4): 529 – 541. [OU Xiaobin, BAO Zhicheng, LYU Jian, et al. Hydrogeochemical characteristics of the hot springs in the Quannan-Xunwu fault zone[J]. Journal of Seismological Research, 2023, 46(4): 529 – 541. (in Chinese with English abstract)]
- [19] PANG Zhonghe, KONG Yanlong, LI Jie, et al. An isotopic geoinicator in the hydrological cycle[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2017, 17: 534 – 537.
- [20] 周训, 李晓露, 王蒙蒙, 等. 浅循环泉简析 [J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(5): 1 – 5. [ZHOU Xun, LI Xiaolu, Wang Mengmeng, et al. A preliminary analysis of the springs of shallow groundwater circulation[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(5): 1 –

5. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 韩朝辉,王郅睿,田辉,等.汉中盆地地下水水化学特征及其成因研究[J].*西北地质*,2023,56(4):263–273. [HAN Chaohui, WANG Zhirui, TIAN Hui, et al. Hydrochemical characteristics and genesis of groundwater in the Hanzhong Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 263–273. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 章双龙,肖富强,邹勇军.江西赣南地区地热伴生氦气资源的发现及异常成因探讨[J].*天然气地球科学*,2024,35(3):495–506. [ZHANG Shuanglong, XIAO Fuqiang, ZOU Yongjun. Discovery of geothermal associated helium resources and exploration of their anomalous origins in the southern Jiangxi region[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35(3): 495–506. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 孙占学,高柏,张展适.赣南地热气体起源的同位素与地球化学证据[J].*地质科学*,2014,49(3):791–798. [SUN Zhanxue, GAO Bai, ZHANG Zhanshi. Isotopic and geochemical evidence for origin of geothermal gases from hot springs in southern Jiangxi Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2014, 49(3): 791–798. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 高柏,孙文洁,张文,等.赣南横迳地区地热温泉气体幔源成因的厘定[J].*桂林工学院学报*,2006,26(1):1–5. [GAO Bai, SUN Wenjie, ZHANG Wen, et al. Identification of mantle origin of geothermal spring gases in Hengjing area in south Jiangxi province[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2006, 26(1): 1–5. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王进,肖则佑,侯怀敏.赣南断褶山地对流型地热系统特征及成因——以石城县楂山里地热系统为例[J].*华东地质*,2020,41(4):381–386. [WANG Jin, XIAO Zeyou, HOU Huaimin. Characteristics and genesis of convective geothermal system in the fault-fold mountains of southern Jiangxi: A case study of Zhashanli geothermal system in Shicheng Country[J]. *East China Geology*, 2020, 41(4): 381–386. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 叶海龙,樊柄宏,白细民,等.石城地热带水文地球化学特征与成因分析[J].*地质学报*,2023,97(1):238–249. [YE Hailong, FAN Binhong, BAI Ximin, et al. Analysis of hydrogeochemical characteristics and origin in the Shicheng geothermal belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(1): 238–249. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 郑茹丹,熊超凡,平建华,等.太行山东南麓断裂带水文地球化学特征及水热成因模式[J].*水文地质工程地质*,2024,51(3):43–56. [ZHENG Rudan, XIONG Chaofan, PING Jianhua, et al. Hydrogeochemical characteristics and hydrothermal genesis model of the fracture zone in the southeastern foothills of Taihang Mountains[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(3): 43–56. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张丽红,郭正府,郑国东,等.藏南新生代火山-地热区温室气体的释放通量与成因——以谷露—亚东裂谷为例[J].*岩石学报*,2017,33(1):250–266. [ZHANG LiHong, GUO ZhengFu, ZHENG GuoDong, et al. Flux and genesis of greenhouse gases emissions from Cenozoic volcanic-geothermal fields, South Tibet: A case study of volcanic-geothermal fields in Gulu-Yadong rift[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(1): 250–266. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 宋岩,戴金星.中国东部温泉气的组合类型及其成因初探[J].*天然气地球科学*,1991,2(5):199–202. [SONG Yan, DAI Jinxing. Discussion on the combination types and genesis of hot spring gas in Eastern China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 1991, 2(5): 199–202. (in Chinese with English abstract)]
- [30] DU Jianguo, CHENG Wenzheng, ZHANG Yiling, et al. Helium and carbon isotopic compositions of thermal springs in the earthquake zone of Sichuan, Southwestern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(5): 533–539.
- [31] 段庆宝,杨晓松,陈建业.地震断层带流体作用的岩石物理和地球化学响应研究综述[J].*地球物理学进展*,2015,30(6):2448–2462. [DUAN Qingbao, YANG Xiaosong, CHEN Jianye. Review of geochemical and petrophysical responses to fluid processes within seismogenic fault zones[J]. *Progress in Geophysics*, 2015, 30(6): 2448–2462. (in Chinese with English abstract)]
- [32] CRAIG H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. *Science*, 1961, 133: 1702–1703.
- [33] 杨旆,王安东,孙占学,等.福建漳州地热水水化学及氢氧同位素特征研究[J].*东华理工大学学报(自然科学版)*,2023,46(2):167–178. [YANG Ni, WANG Andong, SUN Zhanxue, et al. Hydrochemistry and hydrogen-oxygen isotope characteristics of geothermal water in Zhangzhou, Fujian[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2023, 46(2): 167–178. (in Chinese with English abstract)]

- [34] 顾慰祖. 同位素水文学 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 140 – 144. [GU Weizu. Isotope hydrology [M]. Beijing: Science Press, 2011: 140 – 144. (in Chinese)]
- [35] 郑淑蕙, 侯发高, 倪葆龄. 我国大气降水的氢氧稳定同位素研究 [J]. 科学通报, 1983, 28(13): 801 – 806. [ZHENG Shuhui, HOU Fagao, NI Baoling. Study on stable isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1983, 28(13): 801 – 806. (in Chinese)]
- [36] 孙占学, 刘金辉, 高柏. 赣南横迳地区碳酸温泉的同位素水文地球化学研究 [C]//中国地球物理学会第十九届年会论文集. 北京: 中国地球物理学, 2003: 696 – 697. [SUN Zhanxue, LIU Jinhui, GAO Bai. Isotopic hydrogeochemistry of carbonated hot spring in the Hengjing area of southern Jiangxi [C]// Proceeding of the 19th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2003: 696 – 697. (in Chinese with English abstract)]
- [37] GIGGENBACH W F. Geothermal solute equilibria: Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988, 52(12): 2749 – 2765.
- [38] 崔月菊, 孙凤霞, 杜建国. 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 [J]. 地震研究, 2022, 45(2): 199 – 216. [CUI Yueju, SUN Fengxia, DU Jianguo. Methods for identification of seismic geochemical precursors and source partitioning of hot spring fluids in eastern Chinese mainland [J]. Journal of Seismological Research, 2022, 45(2): 199 – 216. (in Chinese with English abstract)]
- [39] BALLENTINE C J, MARTY B, SHERWOOD L B, et al. Neon isotopes constrain convection and volatile origin in the Earth's mantle [J]. *Nature*, 2005, 433: 33 – 38.
- [40] 史杰, 汪美华, 马小军, 等. 新疆塔什库尔干县曲曼地热田地下水同位素研究 [J]. 地球学报, 2022, 43(5): 645 – 653. [SHI Jie, WANG Meihua, MA Xiaojun, et al. Isotope and hydrogeochemical characteristics of the Quman high temperature geothermal field in Taxkorgan, Xinjiang [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(5): 645 – 653. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 晁海德, 陈建洲, 王国仓, 等. 柴达木盆地水溶氦气资源的发现及富集机理 [J]. 西北地质, 2022, 55(4): 61 – 73. [CHAO Haide, CHEN Jianzhou, WANG Guocang, et al. Discovery and enrichment mechanism of water soluble helium resources in Qaidam Basin [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 61 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 邹勇军, 肖富强, 章双龙, 等. 江西省温泉伴生气氦含量特征及其成因分析 [J]. 西北地质, 2022, 55(4): 85 – 94. [ZOU Yongjun, XIAO Fuqiang, ZHANG Shuanglong, et al. Characteristics and causes of helium content in hot spring associated gas in Jiangxi Province [J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(4): 85 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [43] HILTON D R. The helium and carbon isotope systematics of a continental geothermal system: Results from monitoring studies at Long Valley Caldera (California, U. S. A.) [J]. *Chemical Geology*, 1996, 127(4): 269 – 295.
- [44] 戴金星. 天然气碳氢同位素特征和各类天然气鉴别 [J]. 天然气地球科学, 1993, 4(2/3): 1 – 40. [DAI Jinxing. Hydrocarbon isotopic characteristics of natural gas and identification of various natural gases [J]. *Natural Gas Geoscience*, 1993, 4(2/3): 1 – 40. (in Chinese with English abstract)]
- [45] SANO Y, MARTY B. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs [J]. *Chemical Geology*, 1995, 119: 265 – 274.
- [46] RAY M C, HILTON D R, MUÑOZ J, et al. The effects of volatile recycling, degassing and crustal contamination on the helium and carbon geochemistry of hydrothermal fluids from the Southern Volcanic Zone of Chile [J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(1/2): 38 – 49.
- [47] 李其林, 王云, 周艺颖, 等. 滇西北德钦-中甸一带温泉逸出气体的地球化学特征 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2018, 37(4): 645 – 651. [LI Qilin, WANG Yun, ZHOU Yiyang, et al. Geochemical characteristics of hot spring gases from the Deqin-Zhongdian area, Northwestern Yunnan, China [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2018, 37(4): 645 – 651. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华