

罗伟, 杨仕江, 彭静, 等. 黔北遵义地区地热水化学特征及成因[J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 72-83.

DOI: [10.11932/karst20240106](https://doi.org/10.11932/karst20240106)

黔北遵义地区地热水化学特征及成因

罗伟¹, 杨仕江², 彭静¹, 袁余洋¹, 李生红¹, 曾祥建¹, 张信¹

(1. 遵义师范学院工学院, 贵州 遵义 563006; 2. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局三总队, 贵州 遵义 563000)

摘要: 黔北遵义地区地热资源丰富, 但研究程度低, 成因机制不明, 制约了区内地热资源的合理开发利用。文章以遵义地区天然温泉和地热井为研究对象, 采集了 6 组地热水样进行水化学组分、氢氧同位素分析, 探讨了该地区地热水的成因。结果表明: 研究区地热水水化学类型为 $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{Cl}\cdot\text{SO}_4\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 及 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}\cdot\text{Mg}$ 型, 有益元素主要有 Sr 、 Li 、 H_2SiO_3 、 F 。地热水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 主要来源于白云石、方解石的溶解; 盐津桥和坛厂地热水中的 Ca^{2+} , 除来自于白云石、方解石的溶解外, 可能有富石膏白云岩或膏盐层中石膏溶解产生的 Ca^{2+} 加入; 地热水中 SO_4^{2-} 离子主要来源于石膏的溶解。四川含盐盆地古卤水的注入导致盐津桥地热水富 Na^+ 、 K^+ 、 Cl^- 。地热水的补给来源为大气降水, 补给区位于研究区中部的大娄山一带, 补给高程为 1 310.0~1 391.2 m, 补给区年平均气温为 4.4~8.3 °C。利用二氧化硅温标估算的热储温度为 53~95 °C, 地热水循环深度为 1 372~2 633 m。硅-焓模型估算的地热水冷水混入比例为 76%~92%。区内地下水在大娄山区接受大气降水入渗补给, 经深循环并受深部热流加热后, 沿导水断裂上升至地表, 形成天然低温温泉, 或在背斜核部断裂带附近经人工钻探形成地热井。

关键词: 地热水; 水化学; 氢氧同位素; 遵义地区; 贵州北部

创新点: 系统分析了黔北遵义地区地热水中不同离子的来源; 在厘清研究区地热水补给来源、补给条件、热储特征的基础上, 结合地质背景, 建立了其地热系统成因模式。

中图分类号: P641.3; P314 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2024) 01-0072-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

0 引言

地热资源因为清洁、高效、可再生被全球各国广泛利用^[1-2]。贵州北部(以下简称黔北)遵义地区地热资源丰富, 是贵州省中、低温地热资源主要赋存区域之一。区内地热水主要赋热储层为寒武系娄山关组和震旦系灯影组碳酸盐岩地层^[3], 属褶皱断裂型^[4]。研究者对该地区地热水成藏成矿地质背景、水化学组分、水质、类型等方面开展了一系列研究^[5-7]。前人对黔

北地区地热资源的研究多聚焦于资源的禀赋条件、单个温泉或地热井地热水化学特征及资源评价, 但对区内地热水成因机制、运移规律、水岩反应及其与浅层地下水的相互关系尚认识不足, 制约了区内地热资源的高效开发利用。水化学组成和氢、氧同位素(^{18}O 、D)特征是地热水形成、运移过程的指针, 记录了其来源和演化的信息, 是反演地热系统形成机制的有效手段^[8], 在全球地热水研究中获得了广泛运用^[9-12]。

本文以黔北遵义地区分布的 3 个温泉和 3 个地

资助项目: 贵州省基础研究(自然科学)项目(黔科合基础-ZK [2021] 一般 204); 仁怀市矿产资源总体规划(2021-2025 年)

第一作者简介: 罗伟(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为地球化学、水文地质学。Email: Luowei663840@163.com。

通信作者: 杨仕江(1984—), 男, 高级工程师, 研究方向为地球化学、水文地质学。Email: 363060830@qq.com。

收稿日期: 2023-01-01

热井为研究对象,通过分析地热水的水化学组分和氢、氧同位素组成,结合区域地热地质资料,探讨区内地热水的来源、水岩反应过程、补给区高程、补给区温度,计算热储温度、冷热水混合比例及热循环深度,总结成因模型,为该地区地热水资源的勘查、开发利用提供依据。

1 研究区概况

1.1 自然地理及地质概况

研究区位于贵州北部云贵高原向四川盆地过渡的斜坡地段,海拔高程多在1 000~1 500 m,地貌类型主要有低中山、中山和岩溶盆地。大娄山山脉呈NE-SW向展布于研究区北西部,为赤水河-綦江水系和乌江水系的分水岭。研究区气候属亚热带湿润季风气候,多年平均气温14~21 °C,降雨量1 000~1 300 mm。

研究区地处扬子板块西南缘(图 1a),区域上出露新元古代至新生代地层,缺失泥盆系和白垩系。岩性上:震旦系下部以变质陆源碎屑岩为主,上部以碳酸盐岩为主;寒武系、奥陶系、志留系、石炭系主要为碳酸盐岩夹碎屑岩;二叠系、三叠系主要为碳酸盐岩;侏罗系主要为陆相红色岩系;第四系为湖沼沉积物^[13]。构造上发育呈NE向或NNE向展布,由复背斜(较狭窄)、复向斜(较宽缓)相间排列而成的“侏罗山式”褶皱^[14]。断裂构造多分布于背斜的核部,呈NE-SW向、近SN向展布(图 1b)。

1.2 地热地质特征

研究区地处扬子板块内部稳定区,区内未见岩浆岩分布,属正常地温梯度和区域热流值区^[16-17]。区内地热水(井)均分布在背斜核部的断裂带附近(图 1b、1c),水温29~48 °C,流量4~60 L·s⁻¹。坛厂地热井(tc)、岩孔地热井(yc)、桂花地热井(gh)的热储含水层为震旦系上统灯影组白云岩,盖层为寒武系下统金顶山组至牛蹄塘组砂岩,下伏层为震旦系上统陡山沱组、南沱组碳酸页岩(隔水层)^[3]。盐津桥温泉(yjq)、芭蕉温泉(bj)和枫香温泉(fx)出露于寒武系中-上统娄山关组白云岩热储层中,其盖层为志留系下统韩家店组至奥陶系下统湄潭组砂岩^[3]。

2 地热水采集及测试分析

野外采样时间为2022年7月2—3日。在研究

区内共采集了6件地热水样品,其中温泉地热水样3件,钻井地热水样3件,采样位置见图 1b。采样容器选用500 mL聚乙烯塑料瓶,取样时先用蒸馏水润洗采样瓶,后用待采集地热水清洗3~4次。采样时采样瓶瓶口始终置于水面之下,直至采满整瓶水样。每处温泉采集3瓶水样,一份用于阳离子测试(加入优级纯HNO₃直至pH小于2),一份用于阴离子测试,一份用于氢氧同位素测试。现场测量水温和pH值。样品用暗箱冷藏,带回实验室,并在一周内分析。水样水化学成分、氢氧同位素分析均在科荟测试(天津)科技有限公司完成。K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Li、Sr采用电感耦合等离子体发射光谱仪(Avio 500 ICP-OES)测定;F⁻、Cl⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻采用离子色谱仪(Dionex ICS-1100)测定;HCO₃⁻、CO₃²⁻采用滴定法测定;H₂SiO₃采用紫外可见分光光度计(SP-1920)测试。测试精度优于5%。水化学分析的氢氧同位素用英国产稳定气体同位素质谱仪NU prepective测定,δ¹⁸O、δD结果以相对于V-SMOW的千分差表示,测试精度分别为±0.1‰、±0.5‰。

3 分析结果

3.1 地热水水化学特征

地热水水化学分析结果见表 1。测试的地热水样品pH均大于7(7.30~7.95),为中弱碱性水。总溶解性固体(TDS)浓度为187.95~2 322.74 mg·L⁻¹,变化大,均值为877.87 mg·L⁻¹。坛厂地热水中主要的阳离子为Ca²⁺、Mg²⁺,阴离子为SO₄²⁻,水化学类型为SO₄-Ca·Mg型;芭蕉温泉和枫香温泉地热水中主要的阳离子为Ca²⁺、Mg²⁺,阴离子为HCO₃⁻,水化学类型为HCO₃-Ca·Mg型;桂花地热水中主要的阳离子为Na⁺、Ca²⁺,阴离子为HCO₃⁻,水化学类型为HCO₃-Na·Ca型;岩孔地热水中主要的阳离子为Ca²⁺、Na⁺、Mg²⁺,阴离子为HCO₃⁻,水化学类型为HCO₃-Ca·Na·Mg型;盐津桥地热水中主要的阳离子为Na⁺、Ca²⁺,阴离子为Cl⁻、SO₄²⁻,水化学类型为Cl·SO₄-Na·Ca型(图 2)。

有益元素方面,地热水中锶(Sr)、偏硅酸(H₂SiO₃)、氟(F)、锂(Li)的浓度分别为82.81~12 488.14 mg·L⁻¹、21.91~55.28 mg·L⁻¹、0.12~6.82 mg·L⁻¹、0.39~130.00 mg·L⁻¹。除个别温泉外,大部分地热水中Sr、Li、H₂SiO₃、F浓度达到有医用价值的浓度标准^[18]。所有地热水的Sr浓度均>10 mg·L⁻¹,达到命

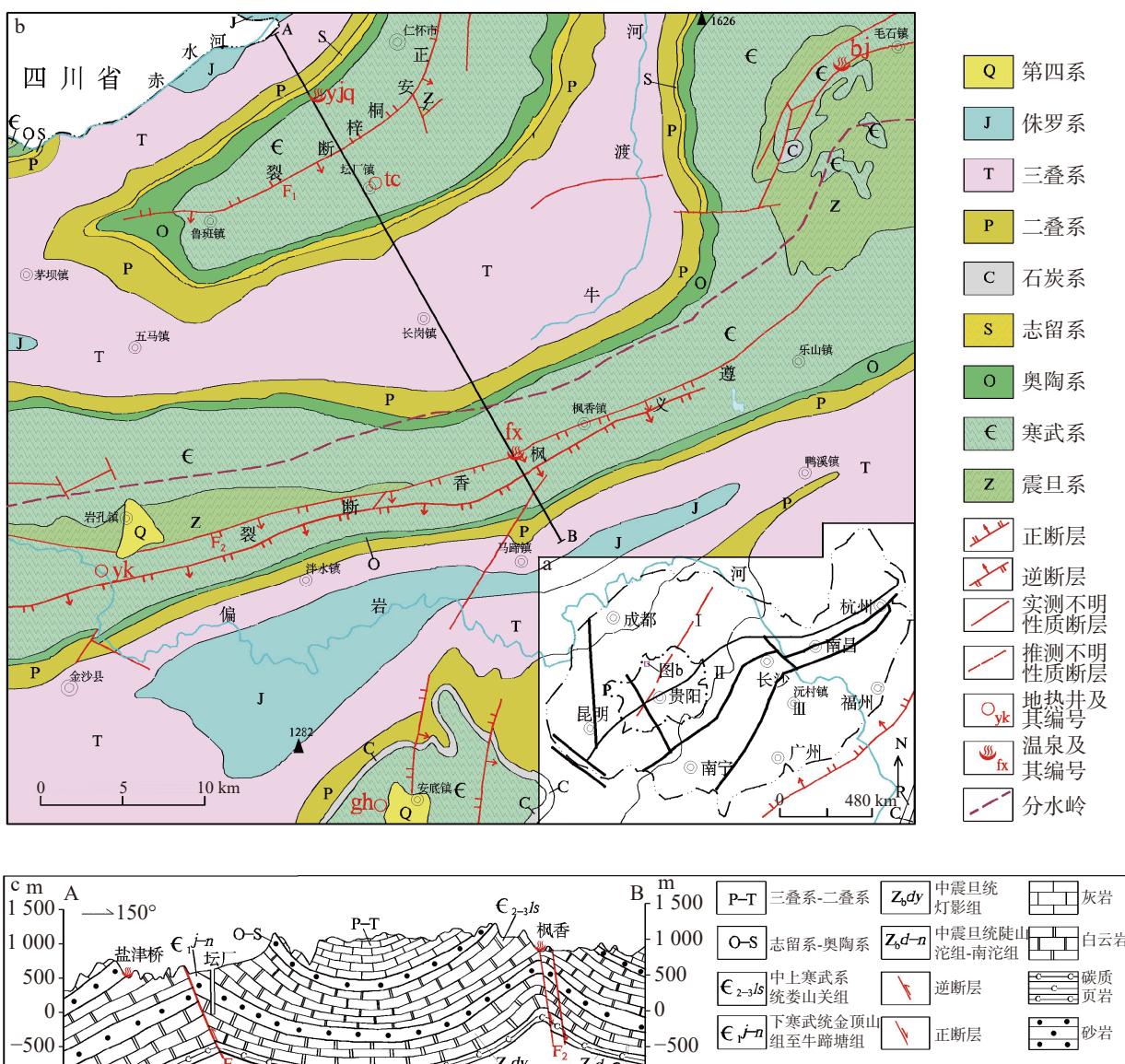


图1 区域大地构造位置图(a:据文献[15]修改)、黔北遵义地区水文地质图(b:据文献[3]修改)及简易水文地质剖面图(c)
I.扬子板块 II.江南造山带 III.华夏板块 yjq.盐津桥温泉 bj.芭蕉温泉 fx.枫香温泉 tc.坛厂地热井 yc.岩孔地热井 gh.桂花地热井

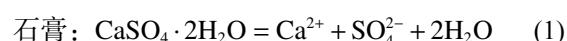
Fig. 1 Geotectonic location (a: revised from reference [15]), hydrogeological map (b: revised from reference [3]), and simplified hydrogeological section map (c) of the Zunyi area, north Guizhou

I. Yangzi plate II. Jiangnan orogen III. Huaxia plate yjq. Yanjiniao spring bj. Bajiao spring fx. Fengxiang spring
tc. Tanchang geothermal well yc. Petrosum geothermal well gh. Guihua geothermal well

名矿水的浓度,可命名为锶水。除芭蕉温泉外,其余地热水样品的Li浓度均 $>5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到命名矿水的浓度,可命名为锂水。

研究区地热水的热储层主要为白云岩(图1c),其主要矿物为白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$),少量方解石(CaCO_3)、石膏(CaSO_4)^[1];研究区地热水中 Ca^{2+} 与 Mg^{2+} 具良好的正相关性($R^2=0.899$,图3a);在 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 图解(图3b)上,研究地热水样品(除坛厂、盐津桥外)落在了白云石和方解石溶解线之间(图3b)。以上特征表明这些地热水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、

HCO_3^- 主要来源于白云石和方解石的溶解。盐津桥和坛厂地热水分别具中和高的 Ca^{2+} 含量,在 $\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$ 图解(图3b)上投到了方解石溶解线之下,表明其 Ca^{2+} 除来源于白云石、方解石的溶解外,尚有其他来源。研究地热水 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 具极好的正相关性(图3c),表明 SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 具相同的源区,可能来源于石膏(CaSO_4)矿物的溶解(式1)。



石膏矿物来源于:①白云岩;②研究区在震旦纪

表1 黔北遵义地区地热水水化学及同位素测试数据

Table 1 Hydrochemical and isotopic analyses of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

温泉名称	芭蕉温泉	盐津桥温泉	坛厂地热井	岩孔地热井	桂花地热井	枫香温泉
水样编号	bj	yjq	tc	yk	gh	fx
pH	7.63	7.38	7.30	7.83	7.95	7.43
F ⁻ /mg·L ⁻¹	0.12	0.67	1.75	2.34	6.82	0.32
Cl ⁻ /mg·L ⁻¹	2.38	384.38	12.37	17.10	11.96	4.12
NO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	3.06	2.87	-	-	2.15	4.95
SO ₄ ²⁻ /mg·L ⁻¹	21.13	301.60	1 449.01	75.72	23.19	50.86
HCO ₃ ⁻ /mg·L ⁻¹	114.11	267.88	136.68	267.88	264.22	199.54
Na ⁺ /mg·L ⁻¹	3.84	273.09	34.08	50.06	73.37	4.27
K ⁺ /mg·L ⁻¹	0.85	28.57	9.65	7.53	7.96	1.41
Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	11.70	5.68	103.29	22.42	9.16	24.10
Ca ²⁺ /mg·L ⁻¹	24.98	118.67	467.04	49.55	28.87	52.06
TDS/mg·L ⁻¹	187.95	1 448.88	2 322.74	514.77	439.66	353.19
H ₂ SiO ₃ /mg·L ⁻¹	21.91	55.28	37.65	44.92	47.08	27.81
Sr/μg·L ⁻¹	82.81	12 488.14	9 120.96	1 225.69	1 028.67	310.13
Li/μg·L ⁻¹	0.39	66.70	44.80	130.00	85.80	5.73
δD _{V-SMOW} /‰	-49.97	-61.18	-61.74	-65.34	-72.10	-50.98
δ ¹⁸ O _{V-SMOW} /‰	-8.24	-9.37	-9.85	-9.94	-11.03	-8.23

注: CO₃²⁻ 低于检测限(5 mg·L⁻¹)未列出, -表示低于检测限。

Note: CO₃²⁻ is not listed because it is lower than the detection limit. The symbol "—" means below the detection limit.

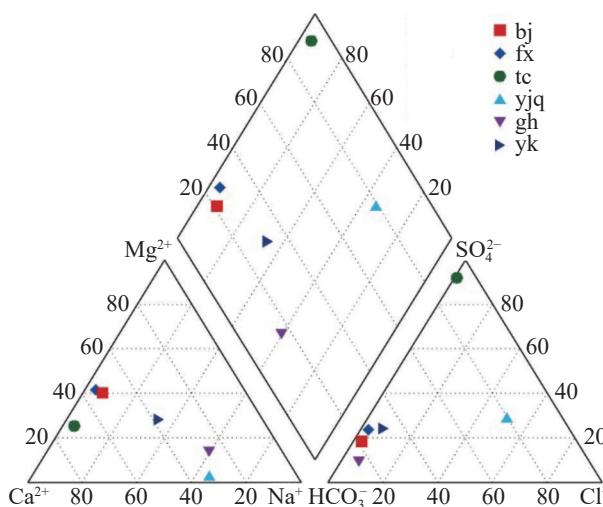


图2 黔北遵义地区地热水水样 Piper 图

Fig. 2 Piper diagram of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

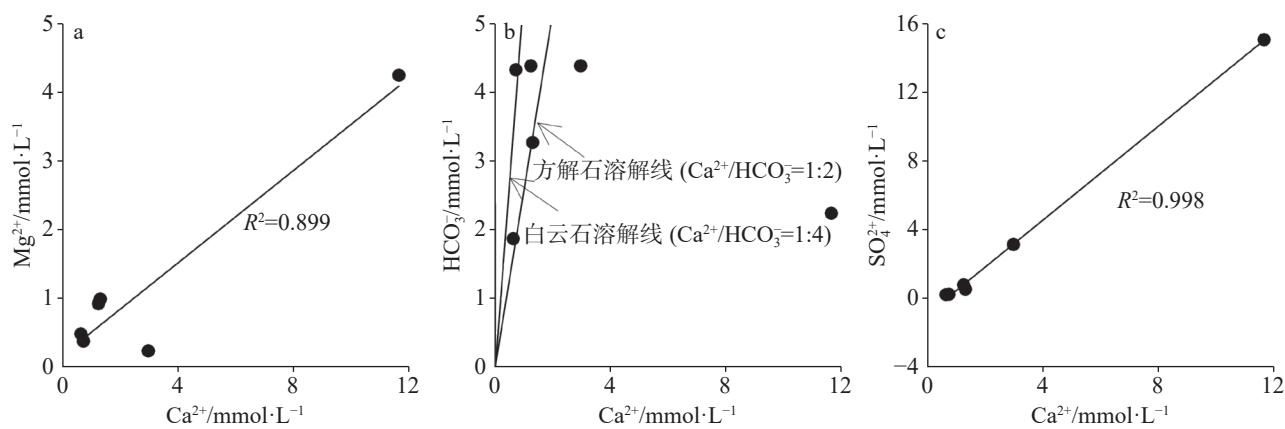
—早奥陶世属局限—半局限台地相沉积, 局部地段沉积的膏盐层^[13]。芭蕉、岩孔、桂花、枫香地热水由于SO₄²⁻和Ca²⁺含量均较低, 其SO₄²⁻可能来源于白云岩中石膏矿物的溶解; 盐津桥地热水具中等含量的Ca²⁺、SO₄²⁻, 其SO₄²⁻和部分Ca²⁺也可能来源于白云岩

中石膏矿物的溶解, 只是石膏矿物含量相对较高; 坛厂地热水具高的SO₄²⁻、Ca²⁺含量, 其SO₄²⁻除了来源于白云岩中石膏矿物的溶解外, 可能尚有来自膏盐层中石膏矿物的溶解, 导致高SO₄²⁻含量的同时, 也提供了较多的Ca²⁺离子。而与坛厂地热井距离较近的盐津桥温泉, 其地热水中的SO₄²⁻、Ca²⁺含量却有较大差异, 这可能是由热储层不同以及正安—桐梓断裂的阻隔导致的。

盐津桥地热水中含异常高的Na⁺、K⁺、Cl⁻。一般来说, Na⁺、K⁺、Cl⁻可能来源于岩盐层的溶解、风化或古卤水的加入^[7]。考虑到盐津桥温泉距离四川含盐盆地较近(图1b), 且在其北西的赤水县境内发现有富Na⁺、K⁺、Cl⁻的旺隆场、太和场热卤水矿床^[3], 本文认为盐津桥温泉高的Na⁺、K⁺、Cl⁻可能是由于四川盆地富Na⁺、K⁺、Cl⁻古卤水的加入导致的。而正安—桐梓断裂阻碍了富Na⁺、K⁺、Cl⁻古卤水向南东的运移, 导致坛厂地热水中Na⁺、K⁺、Cl⁻含量相对较低。

3.2 地热水氢氧同位素特征

氢氧同位素测试结果(表1)显示, 研究地热水δD_{V-SMOW}值为-72.1‰~ -50‰, δ¹⁸O_{V-SMOW}值为

图 3 黔北遵义地区地热水 Ca^{2+} - Mg^{2+} (a)、 Ca^{2+} - HCO_3^- (b) 和 Ca^{2+} - SO_4^{2-} (c) 图解Fig. 3 Diagrams of Ca^{2+} - Mg^{2+} (a), Ca^{2+} - HCO_3^- (b) and Ca^{2+} - SO_4^{2-} (c) in geothermal water of the Zunyi area, north Guizhou

$-11.03\text{\textperthousand}$ ~ $-8.23\text{\textperthousand}$ 。

4 讨 论

4.1 地热水来源

研究地热水与贵州其他地区地热水具有相似的氢氧同位素特征, 其 $\delta D_{\text{V-SMOW}}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}$ 值均分布在中国西南地区大气降水线、全球大气降水线、中国大气降水线附近(图 4), 表明研究地热水来源为大气降水。研究地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 具较弱的负漂移, 表明地热水与围岩反应程度较低, 水-岩作用环境不封闭, 且为低温热储的特征^[19-22]。

4.2 地热水补给高程

研究的地热水均来源于大气降水(图 4)。由于大气降水中氢氧同位素具高程效应(即随着地形高

程的增加, 大气降水中 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 值减小的现象), 因此可以利用该特性确定研究地热水的补给高程(H)。

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

式中: h 为取样点标高, δ_G 为样品的 δD 值(\textperthousand); δ_p 为取样点附近大气降水 δD 值(\textperthousand), 取遵义地区大气降水 δD 值($-39.05\text{\textperthousand}$)^[23]作为参考计算值; K 为大气降水 δD 的高度梯度($-\delta/100 \text{ m}$), 取西南地区大气降水 δD 的高度梯度值($-2.6\text{\textperthousand}/100 \text{ m}$)^[24]作为参考计算值。

计算结果表明, 研究区内内地热水的补给高程在 1 310.0~1 391.2 m(表 2)。研究区地形总体呈现中部大娄山一带高(海拔高程在 1 200~1 600 m), 北西部和南东部低的特点, 其分水岭在中部大娄山一带(图 1b), 区内地热水以温泉(河流峡谷低洼地段)或地热井的形式分布在背斜核部断裂发育地带(图 1c)。结合地形地貌、区域地质构造及温泉分布特征, 认为区内地热水的补给区为周边大娄山山区, 地热水在北西地段由南东向北西径流, 在南东地段由北西向南东径流。

4.3 地热水补给区温度

研究区内内地热水均为大气降水。大气降水量中的 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度(T)存在线性相关关系^[25]:

$$\delta D = 5.61T - 100 \quad (3)$$

$$\delta^{18}\text{O} = 0.695T - 13.6 \quad (4)$$

公式(3)、(4)计算的地热水补给区温度结果较为接近(表 2), 取二者的平均值为区内各地热水的补给区温度, 分别为 8.2 °C(枫香温泉)、6.1 °C(坛厂地热井)、6.5 °C(盐津桥温泉)、4.4 °C(桂花地热井)、

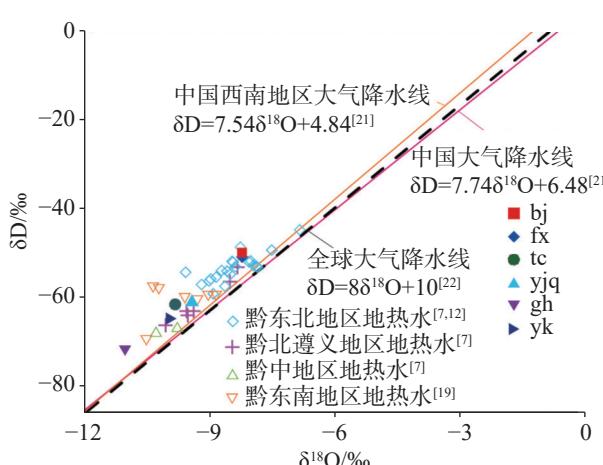
图 4 黔北遵义地区地热水 δD - $\delta^{18}\text{O}$ 关系图Fig. 4 Plot of δD and $\delta^{18}\text{O}$ of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

表2 黔北遵义地区地热水补给高程及温度

Table 2 Recharge elevation and temperature of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

温泉名称	出露高程/m	补给高程/m	补给区温度/℃		备注
			公式(3)	公式(4)	
枫香温泉	925	1 383.8	8.7	7.7	
坛厂地热井	849	—	6.8	5.4	井深837 m
盐津桥温泉	540	1 391.2	6.9	6.1	
桂花地热井	991	—	5.0	3.7	井深1 282 m
芭蕉温泉	890	1 310.0	8.9	7.7	
岩孔地热井	918	—	6.3	5.3	井深1 002 m

8.3 ℃(芭蕉温泉)、5.8 ℃(岩孔地热井),较研究区现今平均气温低8~10 ℃,推测是由于周边补给山区海拔相对较高导致的^[26]。

4.4 热储温度估算

当前,常用的地热水热储温度估算地热温标有阳离子温标、二氧化硅温标、同位素温标和气体温标等^[27]。需要注意的是各种地热温标的采用,均需满足反应物充足、水岩反应达到平衡以及热水(蒸汽)向采样点运移过程中未发生再平衡3个条件^[28]。采用Giggenbach^[29]提出的Na-K-Mg三角图(图5)对研究区地热水样水-岩反应是否平衡进行了判别,研究样品均投到了未成熟水区,且靠近Mg角端点,表明研究区的地热水未达到水-岩平衡状态,可能是地热水上升过程受到浅部地下水(冷水)混合的影响^[12, 30],因此不能采用阳离子温标来估算温泉的热储温度。

二氧化硅温标利用地热水中二氧化硅平衡溶解度与温度的关系来估算地热水热储温度。当温度在300 ℃以下时,压力及矿化度对石英及无定形二氧化硅溶解度的影响极小^[31]。研究区内地热水的泉口温度在29~48 ℃,地热水样中石英和玉髓矿物基本处于饱和状态($SI > 0$ 或者接近于0)(表3,基于PHREEQC软件计算^[32])。因此可以利用二氧化硅温标来计算研究温泉的热储温度。

通过不同公式计算的热储温度见表4。由于研究区内地热水的泉口温度均低于100 ℃,无蒸汽损失存在,因此公式(7)不适用。公式(8)玉髓温标计

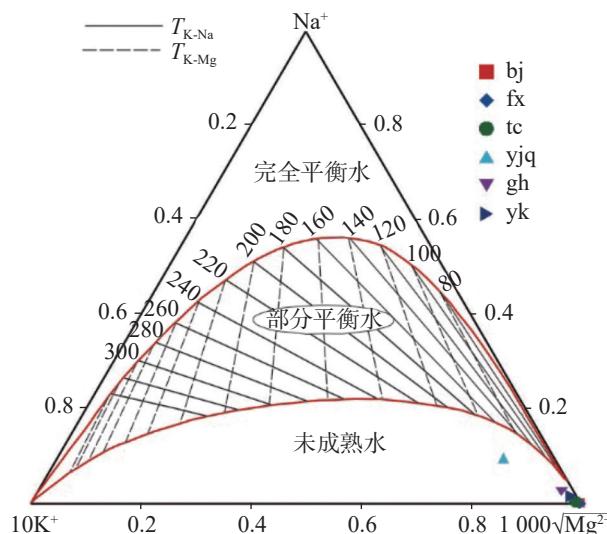


图5 黔北遵义地区地热水Na-K-Mg三角图

Fig. 5 Na-K-Mg triangular diagram of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

算的芭蕉温泉和枫香温泉热储温度低于泉口温度,可能是由于此二地热水玉髓矿物SI值略小于0(表3)导致的,因此舍去公式(8)对此二温泉的计算结果。综合石英温标(5)、(6)和玉髓温标(8)的计算结果可知,芭蕉温泉、枫香温泉、坛厂地热井、盐津桥温泉、桂花地热井、岩孔地热井的热储温度分别为55~60 ℃、65~70 ℃、46~78 ℃、64~95 ℃、56~88 ℃、54~86 ℃。地热井的热储温度与钻孔井内测温结果相近。

4.5 冷热水混合比例估算

研究区地热水均为未成熟水(图5),表明其存在

表3 黔北遵义地区地热水中玉髓和石英饱和指数(SI)

Table 3 Saturation indices of chalcedony and quartz of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

温泉名称	芭蕉温泉	枫香温泉	坛厂温泉	盐津桥温泉	桂花地热井	岩孔地热井
玉髓SI	-0.05	-0.02	0.09	0.19	0.07	0.27
石英SI	0.37	0.37	0.48	0.57	0.43	0.69

表4 黔北遵义地区地热水热储温度估算结果表

Table 4 Estimated geothermal reservoir temperature of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

温泉名称	水样编号	水温/℃	计算热储温度/℃				估算热储温度/℃
			公式(5)	公式(6)	公式(7)	公式(8)	
芭蕉温泉	bj	29	57.06	57.12	63.32	24.82	55~60
枫香温泉	fx	36	66.29	65.99	71.21	34.01	65~70
坛厂地热井	tc	38	78.47	77.96	81.78	46.53	46~78
盐津桥温泉	yjq	44	94.90	94.40	96.14	63.95	64~95
桂花地热井	gh	48	87.89	87.35	90.00	56.45	56~88
岩孔地热井	yk	48	85.87	85.33	88.24	54.31	54~86

注: 公式(5): 石英温标-无蒸汽分离或混合作用 $T(\text{℃})=-42.198+0.28831 \times \text{SiO}_2 - 3.6686 \times 10^{-4} \times (\text{SiO}_2)^2 + 3.1665 \times 10^{-7} \times (\text{SiO}_2)^3 + 77.034 \times \lg(\text{SiO}_2)$;

公式(6): 石英温标-无蒸汽损失($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1309/[5.19-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$;

公式(7): 石英温标-最大蒸汽损失在 100℃ ($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1522/[5.75-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$;

公式(8): 玉髓温标-无蒸汽损失($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1032/[4.69-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$ 。

公式(5)据文献[33], 公式(6)(7)(8)据文献[34], $T(\text{℃})$ 为热储温度, SiO_2 单位为 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

Note: Formula (5): quartz temperature scale-steam free separation or migmatization $T(\text{℃})=-42.198+0.28831 \times \text{SiO}_2 - 3.6686 \times 10^{-4} \times (\text{SiO}_2)^2 + 3.1665 \times 10^{-7} \times (\text{SiO}_2)^3 + 77.034 \times \lg(\text{SiO}_2)$;

Formula (6): quartz temperature scale-steam free loss ($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1309/[5.19-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$;

Formula (7): quartz temperature scale-maximum steam loss at 100℃ ($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1522/[5.75-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$;

Formula (8): Chalcedony temperature scale-steam free loss ($0\sim250\text{℃}$) $T(\text{℃})=1032/[4.69-\lg(\text{SiO}_2)]-273.15$.

Formula (5) is based on reference [33], formula (6), formula (7) and formula (8) are based on reference [34]; $T(\text{℃})$ is the reservoir temperature, and the unit of SiO_2 is $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

浅部冷水混合的可能性。运用硅-焓混合模型估算研究地热水的冷热水比例和初始深部热水温度。硅-焓混合模型假定深部地热水中溶解的二氧化硅处于饱和状态, 地热水上升过程中由于混合浅部冷水, 导致其焓值、二氧化硅含量均降低, 最终得到地热水的终焓和二氧化硅含量。硅-焓混合模型可用下述方程式表述^[35]。

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

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

式中: S_c —近地表冷水的焓; S_h —地热水的终焓; S_s —地热水的初焓; SiO_{2c} —近地表冷水的二氧化硅含量; SiO_{2h} —地热水的二氧化硅含量; SiO_{2s} —地热水的二氧化硅含量; X_1 和 X_2 分别为焓和 SiO_2 含量的冷水混合比例。

研究区与黔东北地区毗邻, 气候条件类似。以黔东北地区 54 件冷泉水统计的二氧化硅值($5.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 热焓值($70.47 \text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$, 水温 16.8℃)^[12]代表研究区近地表冷水二氧化硅值和热焓值, 并根据地热水在不同温度下的热焓值、二氧化硅含量值^[34]计算一系列 X_1 、 X_2 值, 并绘制了硅-焓图(图 6)。结果表明: 研究区地热水中冷水混入比例 76%~92%。需要

说明的是通过硅-焓模型估算的热储温度 $150\sim177\text{℃}$, 明显高于通过二氧化硅温标估算的热储温度, 与钻孔测温结果明显不符, 可能是由于研究地热水为未成熟水, 冷热水混合过程对热储温度的影响过大导致的^[35], 这种方法不适于研究区地热水热储温度的估算。

4.6 地热水循环深度

地热水循环深度(H)可以通过下式计算:

$$H = \frac{T_1 - T_0}{t} + h_0 \quad (7)$$

式中: T_1 为热储温度(℃), 取石英温标计算的热储温度(表 4); T_0 为恒温点温度, 取 16.8℃ ; h_0 为恒温点深度, 取 30 m ^[8, 13]; t 为地温梯度, 取 $3.0\text{℃}/100 \text{ m}$ ^[8, 13]。计算得到了区内地热水循环深度为 $1\ 372\sim2\ 633 \text{ m}$ 。

4.7 地热水成因模型

黔北地区地热系统属中低温对流地热系统^[2]。区内地热水在分水岭(大娄山)北西地区由南东向北西径流, 在南东地区由北西南向南东径流。在重力作用下, 大气降水由海拔为 $1\ 200\sim1\ 600 \text{ m}$ (大娄山地区)的碳酸盐岩基岩裸露区或构造裂隙带渗入寒武系、震旦系白云岩热储层中(地热水最大循

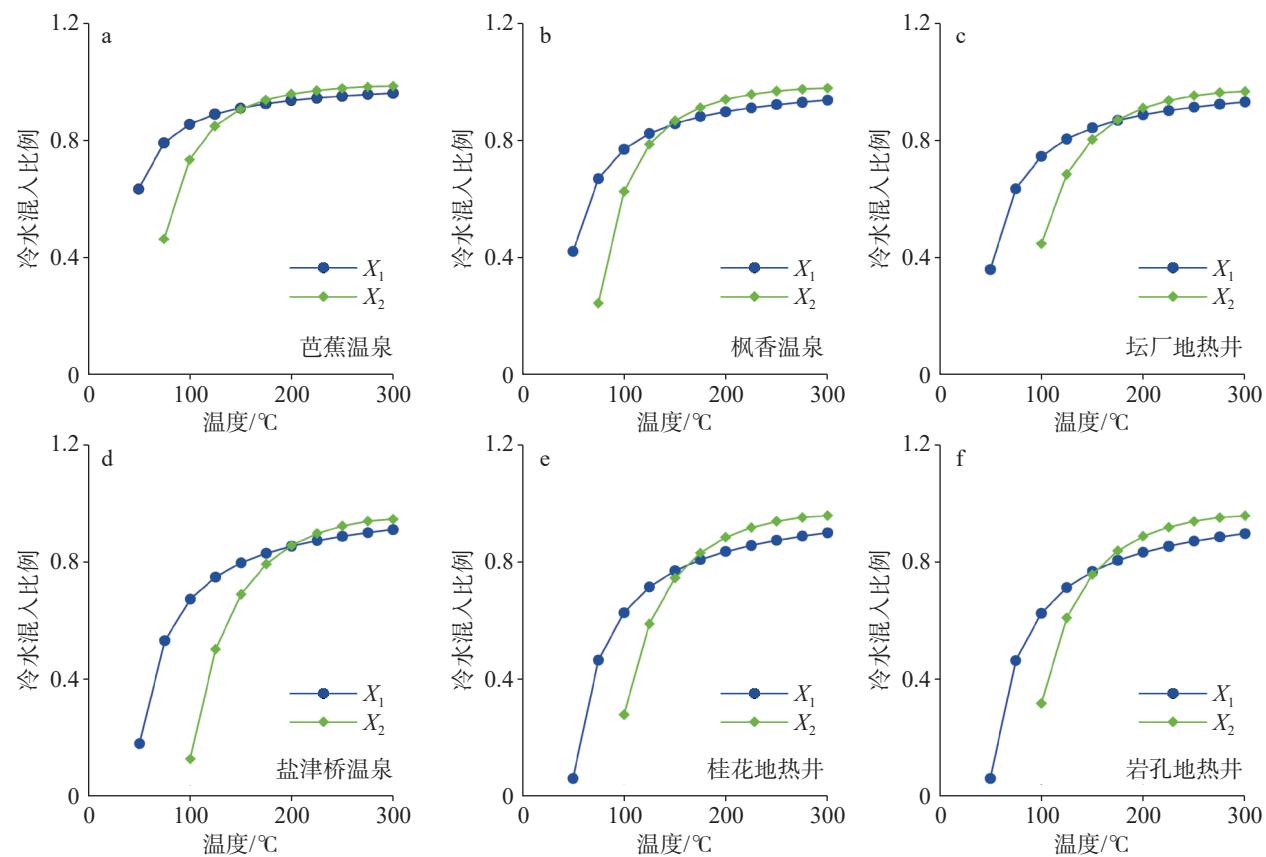


图 6 黔北遵义地区地热水硅-焓图解

Fig. 6 Silicon-enthalpy models for geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

环深度达 2 633 m), 在地温梯度的影响下, 吸热增温, 形成地热水(地热水最大热储温度 95 °C)。在增温的同时, 携带有 CO₂ 的地下水在热储层内与白云岩(主要由白云石组成, 含少量方解石、石膏等矿物)反应, 形成富 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻、SO₄²⁻的地热水。在仁怀地区, 地下水与灯影组热储层内膏盐层、娄山关群热储层内富石膏的白云岩反应, 在各自热储层内形成高度富集和中度富集 Ca²⁺、SO₄²⁻的地热水。地热水在水头压力的作用下, 沿热储层中的岩溶孔隙、溶洞或构造裂隙运移, 部分地热水受北东—南西向阻水断裂疏导至地表(地热水在上升过程中, 与冷水混合, 冷水混入比例 76%~92%), 出露形成低温天然温泉。部分地热水在深部碳酸盐岩热储层中, 由于上覆盖层(碎屑岩类)的圈闭形成承压地热水储库(背斜核部), 后经人工钻探, 形成地热井(图 7)。

5 结 论

(1) 黔北遵义地区地热水为中低温地热水, 呈中

弱碱性。水化学类型有 SO₄-Ca·Mg 型、Cl·SO₄-Na·Ca 型、HCO₃-Ca·Mg 型、HCO₃-Na·Ca 型、HCO₃-Ca·Na·Mg 型。大部分地热水中 Sr、Li、H₂SiO₃、F 含量达到医用价值浓度, 具理疗保健功效。

(2) 黔北遵义地区地热水中的 Ca²⁺、Mg²⁺、HCO₃⁻主要来源于白云石、方解石的溶解。部分地热水(盐津桥和坛厂)中 Ca²⁺含量高, 其除来自于白云石、方解石的溶解外, 可能有富石膏白云岩或膏盐层中石膏溶解产生的 Ca²⁺加入, SO₄²⁻离子主要来源于石膏的溶解。盐津桥地热水中富 Na⁺、K⁺、Cl⁻, 可能是四川含盐盆地古卤水注入导致的。

(3) 黔北遵义地区地热水来源于大气降水, 补给高程为 1 310.0~1 391.2 m, 补给区温度 4.4~8.3 °C。

(4) 黔北遵义地区地热水均为未成熟水, 利用二氧化硅温标估算的热储温度为 53~95 °C, 地热水循环深度 1 372~2 633 m。硅-焓模型估算的地热水冷水混入比例为 76%~92%。

致谢: 野外调查得到卢登遥的鼎力相助, 资料收集得到何文刚博士大力支持, 匿名审稿专家对本文提出了建设性修改意见, 在此一并表示衷心感谢!

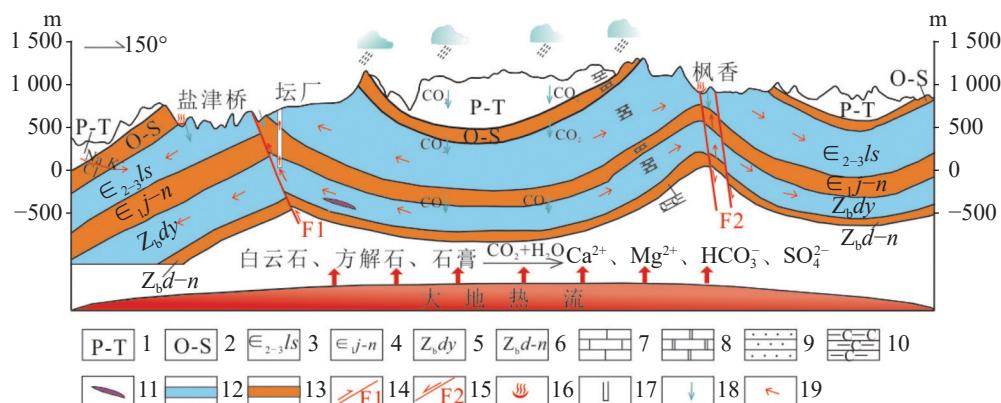


图 7 黔北遵义地区地热水成因模式图

1.二叠系-三叠系 2.奥陶系-志留系 3.中-上寒武统娄山关组 4.下寒武统金顶山组至牛蹄塘组 5.中震旦统灯影组 6.中震旦统陡山沱组-南沱组
7.灰岩 8.白云岩 9.砂岩 10.碳质页岩 11.膏盐层 12.热储层 13.盖层 14.正安-桐梓逆断裂 15.遵义-枫香正断裂 16.温泉 17.地热井
18.大气水渗入补给 19.地热水流向

Fig. 7 Genesis model of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

1. Permian-Triassic system 2. Ordovician-Silurian system 3. Loushanguan Formation of Middle-Upper Cambrian system 4. From Jindingshan Formation to Niutitang Formation of Lower Cambrian 5. Dengying Formation of Middle Sinian 6. Doushantuo Formation-Nantuo Formation of Middle Sinian 7. limestone
8. dolomite 9. sandstone 10. carbonaceous shale 11. gypsum-salt layer 12. thermal reservoir 13. cap rock 14. Zheng'an-Tongzi reverse fault
15. Zunyi-Fengxiangzheng fault 16. spring 17. geothermal well 18. atmospheric water infiltration recharge 19. flow direction of geothermal water

参考文献

- [1] Zhao X G, Wan G. Current situation and prospect of China's geothermal resources[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 32: 651-661.
- [2] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1923-1937.
WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1923-1937.
- [3] 韩至钧, 金占省. 贵州省水文地质志[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 224-318.
HAN Zhijun, JIN Zhansheng. Hydrogeology of Guizhou[M]. Beijing: Seismological Press, 1996: 224-318.
- [4] 杨荣康, 罗维, 裴永伟, 王乾. 贵州省水热型地热资源分布及流体水化学特征[J]. 中国地质调查, 2018, 5(2): 38-44.
YANG Rongkang, LUO Wei, PEI Yongwei, WANG Qian. Distribution and fluids hydrochemistry characteristics of hydrothermal geothermal resources in Guizhou Province[J]. *Geological Survey of China*, 2018, 5(2): 38-44.
- [5] 陈履安. 贵州热矿水热储温度的估算[J]. 贵州地质, 1995, 12(1): 69-77.
CHEN Lyu'an. Estimate of thermal reservoir temperature of thermal mineral water in Guizhou[J]. *Guizhou Geology*, 1995, 12(1): 69-77.
- [6] 陈正山. 贵州理疗热矿水(温泉)形成机理及其对人群健康的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
CHEN Zhengshan. The formation mechanism of physiotherapy thermomineral water (hot spring) in Guizhou and its effect on human health[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [7] Chen Z S, Zhu L J, Liu P, Li C, Zhou Y A, Li Y K, Xie H, Xiang T. Hydrogeochemical evolution mechanism of carbonate geothermal water in Southwest China[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(14): 1310.
- [8] Jayawardana D T, Udagedara D T, Silva A A M P, Pitawala H M T G A, Jayathilaka W K P, Adikaram A M N M. Mixing geochemistry of cold water around non-volcanic thermal springs in high-grade metamorphic terrain, Sri Lanka[J]. *Geochemistry*, 2016, 76(4): 555-565.
- [9] Hartanto P, Alam B Y C S S S, Lubis R F, Ismawan I, Iskandarsyah T Y W M, Sendjaja Y A, Hendarmawan H. The application of hydrogeochemical and stable isotope data to decipher the origin and evolution of hot springs in the Rawadanau basin, Indonesia[J]. *Geothermics*, 2022, 105: 102506.
- [10] 常海宾, 肖江, 皮景. 湖南省地热水水文地球化学特征[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 298-309.
CHANG Haibin, XIAO Jiang, PI Jing. Hydrogeochemical characteristics of geothermal water in Hunan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 298-309.
- [11] 白玉鹏, 李波, 余仕勇, 张秋, 汪斌, 赵宏宇. 云南弥勒红河谷温泉水水化学特征及成因[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 290-297.
BAI Yupeng, LI Bo, YU Shiyong, ZHANG Qiu, WANG Bin, ZHAO Hongyu. Hydrochemistry and genesis of the Honghegu hot spring in Mile, Yunnan Province[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(2): 290-297.
- [12] 宋小庆, 彭钦, 段启彬, 夏颜乐. 黔东北地区地热水化学特征及起源[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2874-2886.
SONG Xiaqing, PENG Qin, DUAN Qishan, XIA Yanle. Hydrochemistry characteristics and origin of geothermal water in northeastern Guizhou[J]. *Earth Science*, 2019, 44(9): 2874-2886.
- [13] 贵州省地调院. 贵州省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 761-798.
Guizhou Provincial Institute of Geological Survey. *Regional Geological Record of Guizhou Province*[M]. Beijing: Geological Press, 2017: 761-798.

- [14] 王砚耕. 贵州主要地质事件与区域地质特征[J]. 贵州地质, 1996, 13(2): 99-104.
WANG Yangeng. Major geo-events and regional geological features of Guizhou[J]. Guizhou Geology, 1996, 13(2): 99-104.
- [15] 戴传固, 陈建书, 王雪华. 贵州省地质系列图及综合研究: 新一代《贵州省区域地质志》[J]. 科技成果管理与研究, 2014(5): 50-55.
DAI Chuangu, CHEN Jianshu, WANG Xuehua. Geological series map and comprehensive study of Guizhou Province: A new generation of regional geological records of Guizhou Province[J]. Management and Research on Scientific & Technological Achievements, 2014(5): 50-55.
- [16] 袁玉松, 马永生, 胡圣标, 郭彤楼, 付孝悦. 中国南方现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2006, 49(4): 1118-1126.
YUAN Yusong, MA Yongsheng, HU Shengbiao, GUO Tonglou, FU Xiaoyue. Present-day geothermal characteristics in South China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(4): 1118-1126.
- [17] 毛小平, 汪新伟, 李克文, 郭少斌. 地热田热量来源及形成主控因素[J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4256-4266.
MAO Xiaoping, WANG Xinwei, LI Kewen, GUO Shaobin. Sources of heat and control factors in geothermal field[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 4256-4266.
- [18] 国家技术监督局. GB/T 11615—2010地热资源地质勘查规范[S]. The State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 11615—2010 Geologic exploration standard of geothermal resources[S]. 2010.
- [19] 李超, 陈正山, 王甘露, 金廷福, 李永康, 罗腾, 毛铁. 贵州东南部地热水地球化学特征及成因[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(3): 614-625.
LI Chao, CHEN Zhengshan, WANG Ganlu, JIN Tingfu, LI Yongkang, LUO Teng, MAO Tie. Geochemical characteristics and origin of geothermal water in southeastern Guizhou, China[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(3): 614-625.
- [20] 邓吉, 王甘露, 陈正山, 卞雨亮, 罗茂会, 沈曦. 贵州水银洞地热水化学特征与成因[J]. 矿物学报, 2021, 41(3): 355-366.
DENG Ji, WANG Ganlu, CHEN Zhengshan, MOU Yuliang, LUO Maohui, SHEN Xi. Hydrochemical characteristics and genesis of the geothermal water in the Shuiyindong area, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2021, 41(3): 355-366.
- [21] 刘进达, 赵迎昌, 刘恩凯, 王东升. 中国大气降水稳定同位素时一空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术, 1997(3): 34-39.
LIU Jinda, ZHAO Yingchang, LIU Enkai, WANG Dongsheng. Discussion on the stable isotope time-space distribution law of China atmospheric precipitation[J]. Site Investigation Science and Technology, 1997(3): 34-39.
- [22] Craig H. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 1961, 133(3465): 1702-1703.
- [23] 李维杰, 王建力, 王家录. 西南地区不同地形降水稳定同位素特征及其水汽来源[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(5): 1132-1142.
LI Weijie, WANG Jianli, WANG Jialu. Characteristics of the stable isotopes in precipitation and the source of water vapor in different terrain in the southwest region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(5): 1132-1142.
- [24] 于津生, 张鸿斌, 虞福基, 刘德平. 西藏东部大气降水氧同位素组成特征[J]. 地球化学, 1980(2): 113-121.
YU Jinsheng, ZHANG Hongbin, YU Fuji, LIU Deping. Oxygen isotopic composition of meteoric water in the eastern part of Xizang[J]. Geochimica, 1980(2): 113-121.
- [25] Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation[J]. Tellus, 1964, 16(4): 436-468.
- [26] 李状, 周训, 方斌, 沈晔, 徐艳秋, 陈柄桦, 王蒙蒙, 隋丽媛. 安徽大别山区温泉的水化学与同位素特征及成因[J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1687-1697.
LI Zhuang, ZHOU Xun, FANG Bin, SHEN Ye, XU Yanqiu, CHEN Binghua, WANG Mengmeng, SUI Liyuan. Hydrochemical and isotopic characteristics and formation of the hot spring in the Dabie mountain area, Anhui Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(9): 1687-1697.
- [27] 王莹, 周训, 于漫, 柳春晖, 周海燕. 应用地热温标估算地下热储温度[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 605-612.
WANG Ying, ZHOU Xun, YU Yuan, LIU Chunhui, ZHOU Haiyan. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs[J]. Geoscience, 2007, 21(4): 605-612.
- [28] Fournier R O. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. Geothermics, 1977, 5(1-4): 41-50.
- [29] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1988, 52(12): 2749-2765.
- [30] 徐刚, 伍坤宇, 王鹏, 陈永东, 李兴彦, 胡林, 刘子畅, 李海. 藏北温泉盆地地热田水文地球化学特征研究[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 299-310.
XU Gang, WU Kunyu, WANG Peng, CHEN Yongdong, LI Xingyan, HU Lin, LIU Zichang, LI Hai. Hydrogeochemical characteristics of the geothermal field in Wenquan basin, northern Tibet[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(3): 299-310.
- [31] 周训, 金晓媚, 梁四海. 地下水科学专论[M]. 北京: 地质出版社, 2010: 32-74.
ZHOU Xun, JIN Xiaomei, LIANG Sihai. Groundwater Science Monographs[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010: 32-74.
- [32] Parkhurst D L. Description of input and examples for PHREEQC Version 3: A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations[M]. Denver, USA: Geological Survey, 2013: 55-59.
- [33] Fournier R O, Potter R W II. Revised and expanded silica (quartz) geothermometer[J]. Geothermal Resources Council Bulletin, 1982, 11(10): 3-12.
- [34] Fournier R O, Truesdell A H. Geochemical indicators of subsurface temperature. Part II. Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water[J]. Journal of Research U. S. Geological Survey, 1974, 2(3): 263-270.
- [35] 袁建飞, 刘慧中, 邓国仕, 李明辉. 广安市铜锣山背斜三叠纪岩溶热储结构特征及热水成因研究[J]. 中国岩溶, 2022, 41(4): 623-635.
YUAN Jianfei, LIU Huizhong, DENG Guoshi, LI Minghui.

Structural characteristics of Triassic carbonate geothermal reservoir and genesis of thermal water in the Tongluo mountain anti-

cline of Guang'an City, China[J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(4): 623-635.

Hydrochemical characteristics and genesis of geothermal water in the Zunyi area, north Guizhou

LUO Wei¹, YANG Shijiang², PENG Jing¹, YUAN Yuyang¹, LI Shenghong¹, ZENG Xiangjian¹, ZHANG Xin¹

(1. College of Engineering and Technology, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006, China; 2. The Third General Team of Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological Exploration Bureau of Guizhou, Zunyi, Guizhou 563000, China)

Abstract The Zunyi area in north Guizhou is located on the slope section transitioning from the Yunnan-Guizhou Plateau to the Sichuan Basin. This area is geotectonically situated on the southwestern margin of the Yangtze plate, where Neoproterozoic strata to Cenozoic strata are exposed with the absence of Devonian and Cretaceous strata. Tectonically, the "Jurassic folds", developed and distributed in the NE or NNE directions, consist of alternating anticlinoria and synclinoria. Fracture structures are mostly distributed in the core of anticlines, spreading in the NE-SW direction or near SN direction. The study area is at normal geothermal temperature gradient and within the regional heat flow value. This area is rich in geothermal resources at low-medium temperature, and its hot springs (wells) are distributed near the fracture zones of anticlines. The thermal reservoirs in this area are mainly composed of dolomite of Cambrian Loushanguan Group and Sinian Dengying Formation.

Generally, the insufficient research and unknown causal mechanisms have restricted the rational development and utilization of geothermal resources in this area. This study takes three hot springs and three geothermal wells distributed in the Zunyi area as research objects. Combining the regional geothermal geological data with the analysis of hydrochemical components and H-O isotope compositions of geothermal water, we explore the geothermal water source, the water-rock reaction process, and the elevation and temperature of recharge, calculate the thermal storage temperature, hot and cold water mixing ratio and thermal cycle depth, and summarize the genesis model of geothermal water, so as to provide a basis for the exploration, development and utilization of geothermal water resources in this area.

The results show that the temperature of geothermal water is 29–48 °C; the pH value is 7.30–7.95; the TDS is 187.95–2,322.74 mg·L⁻¹, the δD and δ¹⁸O are -72.1 ‰ to -50.0 ‰ and -11.03 ‰ to -8.23 ‰, respectively. Hydrochemically, geothermal water falls into SO₄-Ca-Mg, Cl-SO₄-Na-Ca, HCO₃-Ca-Mg, HCO₃-Na-Ca and HCO₃-Ca-Na-Mg types, with main beneficial elements of Sr, Li, H₂SiO₃ and F. Ca²⁺, Mg²⁺ and HCO₃⁻ in geothermal water mainly come from the dissolution of dolomite and calcite. Ca²⁺ in the geothermal water of Yanjiniao and Tanchang may be added from the dissolution of gypsum in gypsum-rich dolomite or gypsum-salt layers, in addition to Ca²⁺ from dissolution of dolomite and calcite. SO₄²⁻ ions mainly come from the dissolution of gypsum. Injections of ancient brines in the saline basin of Sichuan led to the enrichment of Na⁺, K⁺ and Cl⁻ in the geothermal water of Yanjiniao. The H-O stable isotope signature of the water samples indicates that the origin of geothermal water in the study area is atmospheric precipitation recharge. Based on the elevation effect and temperature effect, the elevations of the recharge areas of geothermal water are estimated to be 1,310.0–1,391.2 m, and the average annual temperatures range from 4.4 °C to 8.3 °C. Comprehensive analyses indicate the recharge area is located in Dalou mountain in the central part of the study area. Na-K-Mg triangular diagram shows that the geothermal water in the study area is the unmatured water. The reservoir temperatures are 53–95 °C by the silica temperature scale, and the reservoir depths are 1,372–2,633 m. The percentages of cold water mixing with geothermal water estimated by the silica-enthalpy model are 76%–92%.

Groundwater in the Dalou mountain area is replenished by atmospheric precipitation infiltration, and seeps into the thermal reservoir of Cambrian and Sinian dolomite along the exposed area of Permian-Triassic carbonate bedrock or tectonic fracture zones. Then, under the influence of geothermal gradients, groundwater absorbs heat and increases temperature, forming geothermal water. While becoming warming by increasing temperature, groundwater carrying

CO_2 reacts with dolomite (mainly composed of dolomite with a small amount of calcite, gypsum, and other minerals) within the thermal reservoir to form geothermal water rich in Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , and SO_4^{2-} . In the Renhuai area, groundwater reacts with gypsum-salt beds of the Dengying Formation and gypsum-rich dolomite rocks of the Loushanguan Group to form geothermal water with high and moderate concentrations of Ca^{2+} and SO_4^{2-} within the respective thermal reservoirs. Under the action of head pressure, geothermal water is transported along the karst pores, caves or tectonic fissures in the thermal reservoir. Some of the geothermal water is channeled to the surface by NE-SW oriented water-blocking fractures, and is exposed to form natural hot springs at low temperature. Due to the encirclement of the upper overburden (clastic rock), part of the geothermal water gathers in the deep carbonate thermal reservoir to form a pressurized geothermal water reservoir (anticlinal core), which is drilled by human, and geothermal wells come into being.

Key words geothermal water, hydrochemistry, H-O isotope, the Zunyi area, north Guizhou

(编辑 杨杨)

《中国岩溶》2023 年度高被引论文

为进一步增强《中国岩溶》在学术界的影响力,鼓励广大作者创作出更多高质量的科技论文,并积极推广作者的研究成果,评选基于《中国岩溶》2022 年发表的论文,及论文在 2023 年度内的被引频次

(以 CNKI 数据库引用数据为准),评选出 10 篇年度高被引论文,旨在感谢论文作者对期刊发展做出的突出贡献,结果现予公布:

序号	论文标题	作者	年卷期页
1	基于AHP和GIS技术的湖南怀化地区岩溶塌陷易发性评价	吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 雷明堂, 戴建玲, 罗伟权, 潘宗源	2022, 41(1): 21-33
2	西南岩溶山区地下水评价方法对比研究——以寨底地下河流域为例	杨杨, 赵良杰, 潘晓东, 夏日元, 曹建文	2022, 41(1): 111-123
3	重庆中梁山岩溶地面塌陷特征及形成机理	周正, 李大华, 廖云平, 林军志, 张烨, 陈洪凯, 祁永爱, 王贺	2022, 41(1): 67-78
4	西南喀斯特区土壤侵蚀研究进展	李成芳, 王忠诚, 李振炜, 徐宪立	2022, 41(6): 962-974
5	基于地理探测器与层次分析法的岩溶地面塌陷易发性评价——以重庆中梁山地区为例	王桂林, 强壮, 曹聪, 陈瑶, 郝晋渝	2022, 41(1): 79-87
6	湖南怀化盆地岩溶发育特征与分布规律	吴远斌, 刘之葵, 殷仁朝, 杨建兴, 罗伟权, 雷明堂, 戴建玲, 潘宗源	2022, 41(5): 759-772, 807
7	我国岩溶地区碳汇研究进展与展望	蒋忠诚, 章程, 罗为群, 肖琼, 吴泽燕	2022, 41(3): 345-355
8	古岩溶油气储层研究进展	张宇, 赵伦, 李长海, 张祥忠	2022, 41(5): 808-824
9	华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望	许光泉, 张海涛, 周继生, 李旭, 汪敏华, 刘满才	2022, 41(2): 259-275
10	川北元坝地区茅口组顶面古地貌恢复与岩溶发育特征	曾韬, 季少聪, 夏文谦, 张庆玉, 巴俊杰, 董红琪, 聂国权	2022, 41(6): 860-868, 879