

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.01.05

引用格式: 张蕊, 牟雨亮, 朱立军, 等. 贵州息烽温泉控热推覆构造的发现及成因研究[J]. 中国地质调查, 2023, 10(1): 45-51. (Zhang R, Mou Y L, Zhu L J, et al. Discovery of geothermal nappe structure and genesis research of Xifeng hot spring in Guizhou [J]. Geological Survey of China, 2023, 10(1): 45-51.)

# 贵州息烽温泉控热推覆构造的发现及成因研究

张蕊<sup>1,2</sup>, 牟雨亮<sup>1,2</sup>, 朱立军<sup>1</sup>, 王甘露<sup>1,2</sup>, 曾波<sup>3</sup>

(1. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省石油学会, 贵州 贵阳 550025;

3. 贵州永泰能源页岩气开发有限公司, 贵州 遵义 564200)

**摘要:** 根据近年来磷矿深部勘探资料,对贵州息烽温泉的构造地质条件及地热特征开展研究,获得了有关温泉地质成因的新认识。①由洋水背斜、安清断层( $F_1$ )和温泉断层( $F_2$ )组成的叠瓦状逆冲推覆构造体系,构成了息烽温泉地热系统的主体及边界,该控热构造体系内地表构造与地腹构造并不统一,老地层盖在新地层上,构成顶、底两层叠置的多个热储单元,这些热储单元是地热水形成和运移的良好场所。②安清断层( $F_1$ )使多个热储单元直接接触,从而具有密切的水力联系,为导水、导热的良好通道;温泉断层( $F_2$ )构成了息烽温泉区地热系统的边界。③大气降水沿断裂通道下渗至深部的碳酸盐岩热储层中,吸收热量形成地热水,在高温高压条件下,向洋水背斜核部进行迁移,受上覆寒武系碎屑岩盖层的保护和温泉断层的限制,形成洋水背斜西翼和北端的地热资源有利富集区,最后受分支断层阻挡而自然出露。

**关键词:** 控热构造; 逆冲推覆; 深循环; 息烽温泉

中图分类号: P314.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2023)01-0045-07

## 0 引言

息烽温泉位于贵州省贵阳市息烽县温泉镇,是国内著名的优质含偏硅酸、锶、氡泉,尤其是氡含量达114 Bq/L,与世界著名的法国维琪温泉和卢昆温泉齐名,被誉为“世界三大氡泉,亚洲第一氡泉”<sup>[1]</sup>,是贵州省著名的旅游疗养胜地。

早在1942年,地质学家乐森浔对息烽温泉的成因做了初步探讨<sup>[2]</sup>,认为是大气降水在深循环过程中受地温加热上升出露于地表,形成温泉;1982年,姚在永等<sup>[3]</sup>对息烽温泉的环境地球化学进行了研究,发现该温泉属于较高理疗价值的氡泉;此后,宋小庆、罗腾、吉勒克补子等对息烽温泉进行了系统研究<sup>[4-7]</sup>,均认为息烽温泉地热水形成于洋水背斜深部的震旦系灯影组白云岩和青口白系板溪群变质岩中,其循环深度超过3 000 m。但有一个疑点难以解释,即震旦系灯影组已经在洋水背斜核

部暴露,缺失了上覆的保温盖层,其埋深不会超过1 500 m,地热水很难靠正常地温加热形成,若地热水是循环于更深的前震旦系变质岩中,则其水化学类型应是 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ 型<sup>[8-9]</sup>。然而,息烽温泉的水化学类型为 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 型,明显具有碳酸盐岩热储层的特征,因此,该问题对息烽温泉资源的开发与保护会造成一定误导。根据最新的洋水背斜西翼深部磷矿勘探资料<sup>[10-11]</sup>,洋水背斜为大型逆冲推覆构造体系,地表构造与地腹构造并不统一。因此,笔者基于对息烽温泉控热构造体系的研究,重新分析了补给径流排泄过程,对该温泉的地质成因有了新认识,旨在为该区地热资源勘探开发提供参考。

## 1 地质背景

### 1.1 构造地质背景

根据贵州构造单元划分方案<sup>[12]</sup>,研究区位于黔北隆起区遵义台地区凤冈SN向构造变形区和织

收稿日期: 2021-07-23; 修订日期: 2021-11-02。

基金项目: 贵州省自然资源厅“贵州省地质勘查基金项目(编号: 2017-02)”资助。

第一作者简介: 张蕊(1998—),女,硕士研究生,主要从事非常规油气、地热地质工作。Email: 695039887@qq.com

通信作者简介: 牟雨亮(1990—),男,博士研究生,主要从事非常规油气、地热地质工作。Email: 351281174@qq.com。

金穹盆构造变形区的结合部位。以安清断层( $F_1$ )为界,西为织金穹盆构造变形区,东为凤冈SN向构造变形区。区域上新元古界前震旦系至中生界侏罗系均有分布,受黔中隆起的影响,该区缺失奥陶

系、志留系、泥盆系和大部分石炭系(图1)。构造形迹主要为NE向及近SN向,构造样式主要为隔槽式褶皱组合,局部为穹窿-构造盆地及短轴背向斜组合。

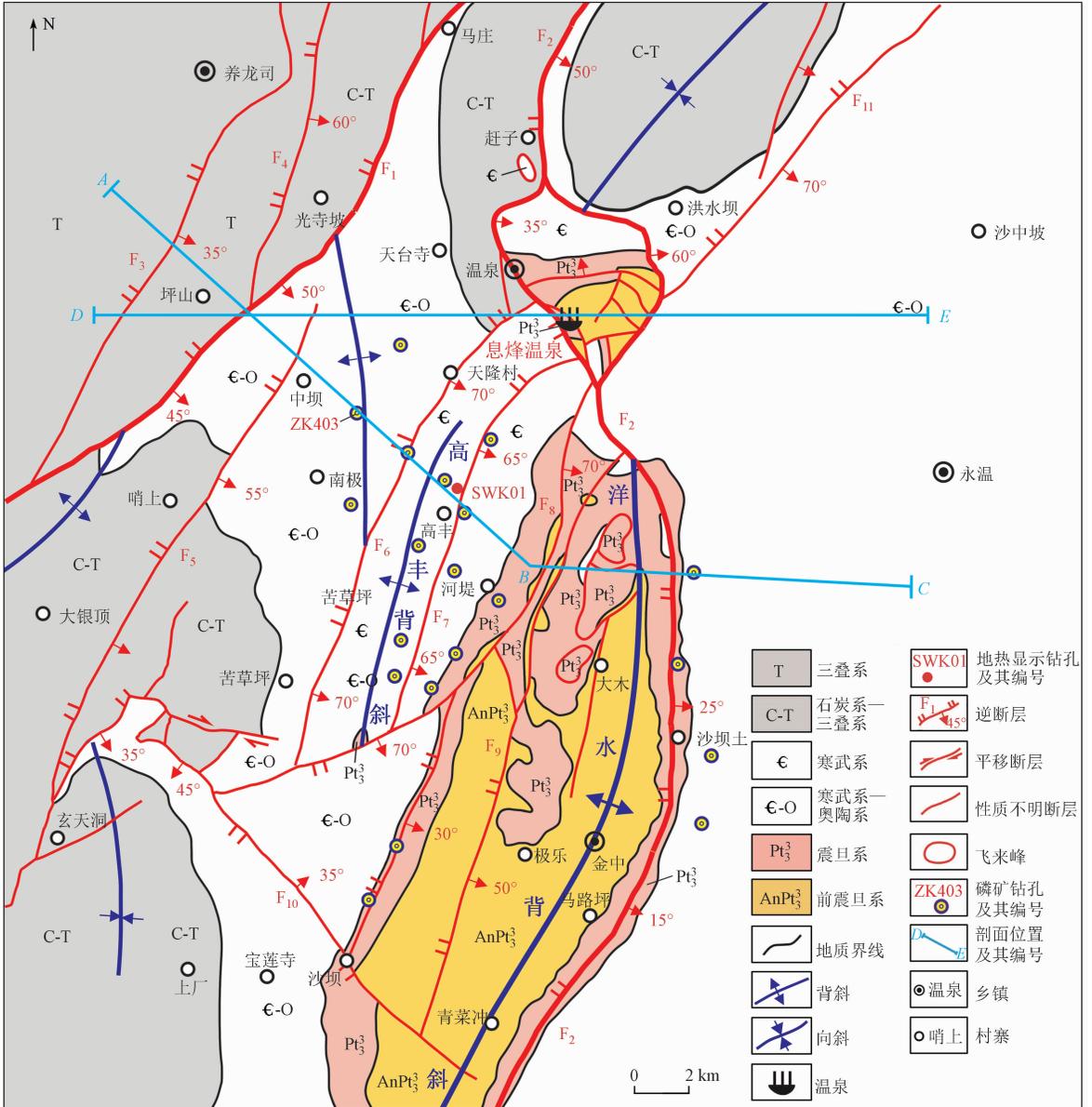


图1 研究区区域构造简图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Regional structure of the study area <sup>[13]</sup>

### 1.2 洋水背斜特征

研究区构造样式为洋水背斜和安清断层( $F_1$ )、温泉断层( $F_2$ )2条逆冲推覆断层构成的叠瓦状逆冲推覆构造体系<sup>[13]</sup>,构造形迹以NNE向、NE向为主。

洋水背斜轴向为NE向,呈长条状,长约40 km,核部出露前震旦系清水江组和南沱组,

东翼出露震旦系—寒武系,倾角 $10^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ,西翼地层相对完整,出露震旦系—三叠系,倾角 $25^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 。发育多条逆冲断裂和次级褶皱,在剖面(位置见图1中ABC剖面)上呈叠瓦状分布,使得地层发生叠瓦状重复、错位或者缺失(图2)。背斜北部发育数个飞来峰,为温泉断层( $F_2$ )逆推牵引所致(图1)。

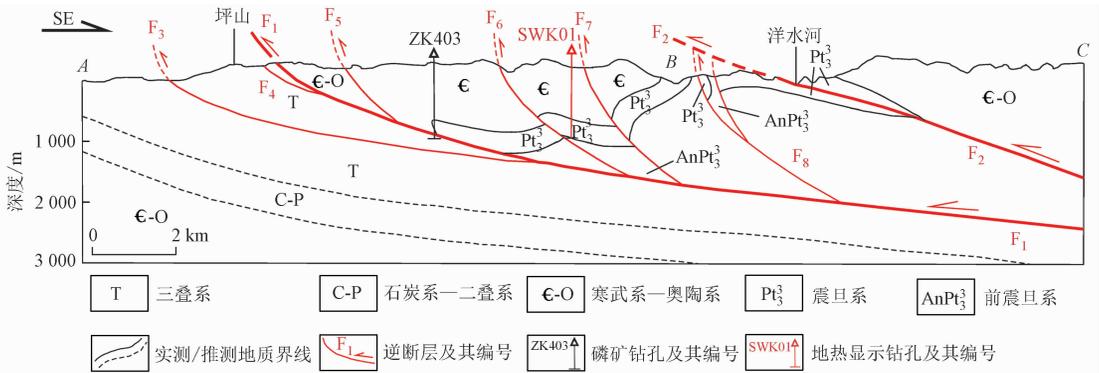


图 2 洋水背斜构造剖面<sup>[13]</sup>

Fig. 2 Structural section map of Yangshui Anticline<sup>[13]</sup>

安清断层(F<sub>1</sub>)位于研究区西部,是区域构造变形单元边界断层(遵义—贵阳断裂)南段,为贵州省规模最大的SN向断层,在贵州境内全长约240 km。根据洋水背斜西翼的ZK403磷矿钻孔,从寒武系清虚洞组开孔,钻至震旦系灯影组后,在1 183.91 m过安清断层(F<sub>1</sub>),变为中生代三叠系嘉陵江组<sup>[14]</sup>。安清断层(F<sub>1</sub>)作为应力的释放区域,表现出大型低角度逆冲推覆构造特征,使寒武系和前寒武系逆冲叠于二叠系—三叠系之上。据推算,该断层垂直断距可达3 500 m以上,水平断距可能超过10 km<sup>[13]</sup>,限制了洋水背斜向深部的延伸(图2)。这表明洋水背斜地表构造和地腹构造并不统一,虽然其核部已经出露前震旦系,但深部并非为古老的变质岩基底,而是更新的古生代—中生代地层。

温泉断层(F<sub>2</sub>)位于研究东部,为区域另一大型逆冲断层,近SN走向,受剥蚀影响,在洋水背斜北端核部形成多个飞来峰,向北延伸至息烽温泉一带,分叉形成一个较大的断夹块,其内发育较多的次级断层,息烽温泉就出露于断夹块中(图1)。

## 2 控热构造体系

区域上,安清断层(F<sub>1</sub>)和温泉断层(F<sub>2</sub>)2条大型逆冲推覆断层向北逐渐收敛,所围限的地块南宽北窄,呈楔形,为典型的构造楔。纵向上,上部构造层为温泉断层(F<sub>2</sub>)发育的次级逆冲断层,受剥蚀严重,仅在高处形成飞来峰,下部构造层以安清断层(F<sub>1</sub>)为主,其次为多条(个)次级断层和褶皱。这

些次级断层向深部逐渐缓交于安清断层(F<sub>1</sub>)之上,是一个典型的叠瓦状组合。

由此说明,由洋水背斜、安清断层(F<sub>1</sub>)和温泉断层(F<sub>2</sub>)组成的叠瓦状逆冲推覆构造体系,构成了息烽温泉地热系统的主体及边界。平面上,南宽北窄的楔状构造,使地热水不断聚集;纵向上,上部构造层的洋水背斜形成了良好的聚热保热体系,下部构造层的石炭系—三叠系则形成了良好的补给、径流体系(图2)。这样地表构造与地腹构造不统一的控热构造体系,便能合理解释息烽温泉地质成因上的疑点。

研究区洋水背斜为良好的热储构造,具有许多热显示,如背斜核部的息烽温泉和白马峪温泉,背斜西翼的两岔河SWK01钻孔(图1),地热源主要为地壳深部的热传导和含铀地层中放射性物质衰变产生的热。在洋水背斜热储构造上,可划分出多个热储单元(表1)。以安清断层(F<sub>1</sub>)为界,断层上盘为前震旦系—寒武系构成的两个顶层热储单元,其中清虚洞组—娄山关组热储层已暴露,深部震旦系灯影组白云岩热储层埋深为900~1 350 m,上覆发育较厚的保温盖层,是主要的热储层;断层下盘为寒武系—三叠系构成的多个底层热储单元,埋深为1 000~3 000 m。安清断层(F<sub>1</sub>)作为区域性深大断裂,使这些热储单元直接接触而具有密切的水力联系,为导水、导热的良好通道。温泉断层(F<sub>2</sub>)具有阻水性质<sup>[15-16]</sup>,其两盘分属2个独立地下水系统,构成了息烽温泉区地热水系统的边界,息烽温泉便在该断层带上出露。

表1 息烽温泉地热水储、盖层及水文地质特征

Tab.1 Geothermal water reservoir and caprock and hydrogeological features of Xifeng hot spring

热储构造	地层单元	厚度/m	水文地质特征	储、盖层	
顶层热储单元	寒武系	清虚洞组—娄山关组	800 ~ 962	白云岩、石灰岩,富水性强	热储层
		牛蹄塘组—金顶山组	636 ~ 767	碎屑岩类岩层,富水性差	保温层
	震旦系	灯影组	216 ~ 278	中厚层白云岩,富水性强	热储层
		洋水组	2 ~ 25		
底层热储单元	前震旦系	南沱组	0 ~ 280	碎屑岩类岩层,含水性差	保温层
		清水江组	> 300		
	三叠系	夜郎组—嘉陵江组	570 ~ 990	灰岩、白云岩夹碎屑岩,富水性强	热储层
		龙潭组—长兴组	106 ~ 460	碎屑岩夹灰岩,富水性差	保温层
	二叠系	峨眉山玄武岩组	0 ~ 103	喷发岩,富水性差	保温层
		梁山组—茅口组	187 ~ 330	生物屑灰岩,富水性中—强	热储层
	石炭系	九架炉组	10 ~ 30	石英砂岩(较薄)	保温层
	寒武系	清虚洞组—娄山关组	800 ~ 962	白云岩、石灰岩,富水性强	热储层

### 3 水化学特征

息烽温泉有3处天然出露于黑滩河右岸,泉点平均出露标高为694 m,常年水温恒定在53 ~ 56 °C,天然涌水量12.85 ~ 13.08 L/s。左岸有1眼地热井,井深200 m,泉口标高695 m,水温52 ~ 53 °C,天然涌水量810 m<sup>3</sup>/d。多年观测显示其水温、水量变化均较小,水质分析结果如表2所示。

表2 息烽温泉水质分析结果

Tab.2 Water quality analysis of Xifeng hot spring

分析项目	温泉1号	温泉2号	温泉3号	地热井
Ca <sup>2+</sup>	52.76	54.32	57.42	54.32
Mg <sup>2+</sup>	21.17	20.70	23.53	21.65
K <sup>+</sup>	3.50	3.50	3.60	3.50
Na <sup>+</sup>	14.00	12.00	13.10	13.30
Fe <sup>3+</sup> + Fe <sup>2+</sup>	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	182.58	178.68	191.01	191.01
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	86.00	86.00	94.00	86.00
Cl <sup>-</sup>	5.02	4.82	6.27	4.82
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3.22	4.82	4.34	3.03
F <sup>-</sup>	1.50	1.20	1.40	1.40
可溶性 SiO <sub>2</sub>	32.00	41.39	41.39	41.39
偏硅酸	53.79	58.75	58.75	58.75
锶	1.84	1.54	1.57	1.52
锂	0.06	0.05	0.06	0.05
耗氧量	0.04	0.08	0.16	0.17
游离 CO <sub>2</sub>	4.87	12.17	12.17	12.17
总硬度(以 CaCO <sub>3</sub> 计)	218.95	220.88	240.26	224.76
溶解性固体	308.96	382.85	411.26	381.62
pH 值	7.55	7.54	7.68	7.71
氡	114.00	92.00	148.90	35.00

注:测试单位为国土资源部贵阳矿产资源监督检测中心;表中氡的单位为 Bq/L, pH 值无单位,其余指标单位为 mg/L。

据息烽温泉水质分析结果(表2),pH 值为7.54 ~ 7.71,呈弱碱性,溶解性固体为308.96 ~ 411.26 mg/L,平均值为371.17 mg/L,属低矿化水。主要阳离子为Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>、Na<sup>+</sup>,主要阴离子为SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。从Piper 三线图(图3)可以看出,该温泉水化学类型为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>型。其中Sr和H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>均达到饮用天然矿泉水标准,温度、H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>含量、氡含量均达到理疗天然矿泉水标准。因此,息烽温泉为可饮可溶的珍稀天然矿泉水。

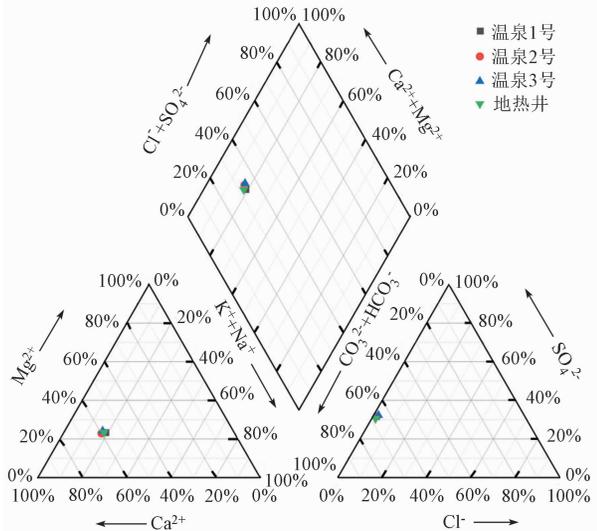


图3 Piper 三线图

Fig.3 Piper trilinear diagram

δD 与 δ<sup>18</sup>O 同位素研究表明<sup>[4-7]</sup>,息烽温泉来源于大气降水,其在深部循环过程中吸收大地热流形成地热水。采用 SiO<sub>2</sub> 地热温标法估算热储温度,公式为  $T = 1309 / (5.19 - \lg w(\text{SiO}_2)) - 273.15$  <sup>[17-18]</sup>。

(1)

式中:  $T$  为热储温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

计算热水循环深度, 公式为

$$Z = (T_z - T_0) / G + Z_0 \quad (2)$$

式中:  $Z$  为循环深度,  $\text{m}$ ;  $G$  为地热增温度, 值为  $2.8 \text{ }^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$ ;  $T_z$  为地下热储热水温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  为研究区多年平均气温, 值为  $16.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $Z_0$  为常温带深度, 值为  $30 \text{ m}$ 。

经计算, 息烽温泉热储温度为  $93.51 \sim 101.92 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 地热水循环深度为  $2\ 779 \sim 2\ 970 \text{ m}$ 。

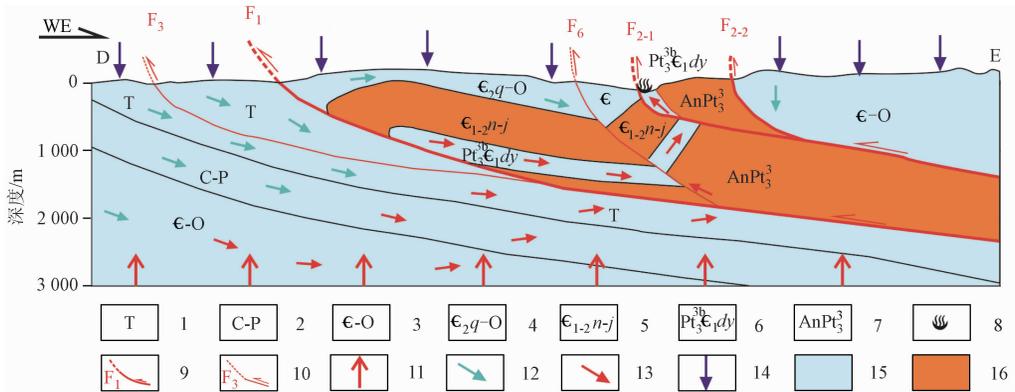
因洋水背斜核部已出露震旦系, 在缺乏深部构造资料的情况下, 前人推测息烽温泉地热水循环于洋水背斜深部的前震旦系变质岩中。在贵州省, 形成于变质岩中地热水的水化学类型均为  $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$  型<sup>[19-20]</sup>, 而息烽温泉水化学类型为  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-} - \text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  型, 明显具有形成于碳酸盐岩热储层的特征。另外, 息烽温泉含有较高的  $\text{SO}_4^{2-}$ , 其  $\text{S}$  同位素证据表明, 这是由于寒武系三统娄山关组膏盐的溶解所致<sup>[5]</sup>。因此, 前人的推测出现矛盾之处。息烽温泉控热推覆构造的发现, 查明了洋水背斜深部构造特征, 其深部穿过安清断层后是寒武系一三叠系, 大气降水沿断裂通道下渗后, 在这些深部的碳酸盐岩热储层中运移并吸收热量变成地热水, 与此同时, 进行长时间的水岩反应, 形成现今的息烽温泉地热水特征。

### 4 息烽温泉成因

洋水背斜地区磷矿深部勘探揭示了研究区地

表构造与地腹构造并不统一的控热构造体系, 安清断层( $F_1$ )和温泉断层( $F_2$ )2条深大断裂以及洋水背斜构成了叠瓦状逆冲推覆构造体系, 形成息烽温泉地热水系统的主体及边界。安清断层( $F_1$ )和温泉断层( $F_2$ )所围限的洋水背斜形成良好的聚热、保热体系, 安清断层( $F_1$ )下盘的石炭系一三叠系形成了地热水的补给和径流体系, 这种地层具有上老下新的组合特征, 造成多个碳酸盐岩热储单元叠置。同时, 安清断层( $F_1$ )使得多个热储含水层相互叠置并相互联通, 并沟通了深部热源, 为地热水的形成和运移提供了良好的条件, 温泉断层( $F_2$ )则起着地热水深部循环阻挡边界的作用。

息烽温泉的水温、流量动态变化稳定, 说明地热水补给范围广, 补给源充足, 径流时间长。因此, 息烽温泉的形成过程大致为: 大气降水在洋水背斜西翼及北部的寒武系和二叠系一三叠系大面积裸露的碳酸盐岩地区形成息烽温泉的主要补给区, 之后, 大气降水在源源不断沿含水层下渗, 至背斜深部底层热储单元中的寒武系一三叠系热储含水层中, 深度可达  $3\ 000 \text{ m}$ , 同时吸收大地热流和放射性物质的衰变, 产生热源, 形成地热水, 并受到寒武系碎屑岩盖层的隔水保温作用, 高温高压条件下, 地热水沿震旦系灯影组白云岩含水层及断裂通道向洋水背斜核部热储构造进行迁移, 受到温泉断层( $F_2$ )边界限制, 形成了洋水背斜西翼和北端的地热资源有利富集区, 最后受黑滩河断裂( $F_{2-1}$ )阻挡而自然出露(图4)。



1. 三叠系; 2. 石炭系一二叠系; 3. 寒武系一奥陶系; 4. 寒武系清虚洞组一奥陶系; 5. 寒武系牛蹄塘组一金顶山组; 6. 灯影组; 7. 前震旦系; 8. 温泉; 9. 主要断层及其编号; 10. 次级断层及其编号; 11. 大地热流; 12. 大气降雨下渗途径; 13. 地热水径流途径; 14. 大气降水; 15. 含水层; 16. 隔水层

图 4 贵州息烽温泉深循环过程剖面示意图

Fig. 4 Deep circulation schematic diagram of Xifeng hot spring

正常情况下,浅部的寒武系碳酸盐岩热储层埋藏浅,基本已经暴露,很难形成地热水聚集,深部则应该是前震旦系的变质岩地层,不可能存在碳酸盐岩热储层型地热水。而在息烽温泉推覆构造控热体系下,尽管洋水背斜核部已经出露震旦系,但双重推覆构造使得地层具有上老下新的组合特征,多个碳酸盐岩热储单元的叠置,具备良好的储、盖、通、源4个基本要素和有利的开采条件,具有进一步钻探、开发、扩大地热利用的远景。

## 5 结论

(1)由洋水背斜、安清断层(F<sub>1</sub>)和温泉断层(F<sub>2</sub>)组成的叠瓦状逆冲推覆构造体系,构成了息烽温泉地热水系统的主体及边界,该控热构造体系内地表构造与地腹构造并不统一,地层分布具有上老下新的特征,构成多个叠置的碳酸盐岩热储单元,这些热储单元成为地热水形成和运移的良好场所。

(2)安清断层(F<sub>1</sub>)使顶层和底层的多个热储单元直接接触,从而具有密切的水力联系,为导水、导热的良好通道;温泉断层(F<sub>2</sub>)两盘分属2个独立地下水系统,构成了息烽温泉区地热水系统的边界。

(3)息烽温泉水温、水量、水质常年稳定,该温泉水化学类型为HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>型,其中Sr和H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>均达到饮用天然矿泉水标准,温度、H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>含量、氨含量均达到理疗天然矿泉水标准。因此,息烽温泉为可饮可浴的珍稀天然矿泉水。

(4)大气降水沿断裂通道下渗至深部的碳酸盐岩热储层中,在运移过程吸收地温变成地热水,在高温高压条件下,向洋水背斜核部进行迁移,受到安清断层(F<sub>1</sub>)和温泉断层(F<sub>2</sub>)所围限构造楔的限制,形成洋水背斜西翼和北端的地热资源有利富集区,最后受黑滩河断裂阻挡而自然出露。

## 参考文献 (References):

[1] 唐明贵,殷红梅. 息烽温泉生态旅游发展模式研究[J]. 资源开发与市场,2012,28(12):1136-1138.  
Tang M G, Yin H M. Study on development modes of Xifeng hot spring ecotourism[J]. Resour Dev Market, 2012, 28(12): 1136-1138.

[2] 姚在永,马昌华,李春远,等. 贵州息烽天然饮用矿泉水普查评价报告[R]. 贵阳:贵州省地矿局第一水文地质工程地质大队,1988.

Yao Z Y, Ma C H, Li C Y, et al. Investigation and Evaluation Report of Natural Drinking Mineral Water in Xifeng[R]. Guiyang: The 1st Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources, 1988.

[3] 姚在永,成忠礼,王俊文. 息烽泉环境地球化学的初步研究[J]. 地球化学,1982,10(1):76-81.  
Yao Z Y, Cheng Z L, Wang J W. A preliminary environmental geochemical study on the radon springs in Xifeng, Guizhou Province[J]. Geochimica, 1982, 10(1): 76-81.

[4] 宋小庆,段启杉,孟凡涛,等. 贵州息烽温泉地质成因分析[J]. 地质科技情报,2014,33(5):216-220.  
Song X Q, Duan Q S, Meng F T, et al. Geological genesis analysis of the Xifeng hot spring in Guizhou[J]. Geol Sci Technol Inform, 2014, 33(5): 216-220.

[5] 罗腾. 贵州息烽矿泉水中H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>、Sr富集机理研究[D]. 贵阳:贵州大学,2020.  
Luo T. Study on the Enrichment Mechanism of H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> and Sr in Xifeng Mineral Water[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.

[6] 吉勒克补子. 贵州息烽磷矿井下开采对息烽温泉影响研究[J]. 资源信息与工程,2016,31(3):73-74.  
Jile K B Z. Study on influence of underground mining on Xifeng hot spring in Xifeng phosphate mine, Guizhou[J]. Resour Inform Eng, 2016, 31(3): 73-74.

[7] 吉勒克补子,李强,洪运胜,等. 贵州息烽温泉水文地球化学特征及地质成因研究[J]. 四川地质学报,2020,40(3):434-438.  
Jile K B Z, Li Q, Hong Y S, et al. Study of hydrogeochemical characteristics and origin of the Xifeng hot spring in Guizhou[J]. Acta Geol Sichuan, 2020, 40(3): 434-438.

[8] 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 Z S. The Formation Mechanism of Physiotherapy Thermo-mineral Water (Hot Spring) in Guizhou and its Effect on Human Health[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.

[9] 李超,陈正山,王甘露,等. 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 C, Chen Z S, Wang G L, et al. Geochemical characteristics and origin of geothermal water in southeastern Guizhou, China[J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 2020, 39(3): 614-625.

[10] 贵州开磷(集团)有限责任公司. 贵州省开阳县洋水矿区西翼深部磷矿资源储量核实报告[R]. 贵阳,2013.  
Guizhou Kailin (Group) Co., Ltd. Verification Report on Deep Phosphate Ore Resource Reserves in the West Wing of Yangshui Mining Area, Kaiyang County, Guizhou Province [R]. Guiyang, 2013.

[11] 贵州开磷(集团)有限责任公司. 贵州开阳磷矿洋水矿区西翼深部延伸勘探报告[R]. 贵阳,2019.  
Guizhou Kailin (Group) Co., Ltd. Deep Extension Exploration Report of West Wing of Yangshui Ore District of Kaiyang Phosphate Mine, Guizhou Province [R]. Guiyang, 2019.

[12] 李延栋. 中国区域地质志——贵州志[M]. 北京:地质出版社,2017.  
Li T D. Regional Geology of China - Guizhou [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.

- [13] 王槐山,蔡兴林,雷灵芳,等. 开阳磷矿洋水矿区构造特征分析[J]. 化工矿产地质,2017,39(2):90-95.  
Wang H S, Cai X L, Lei L F, et al. Analysis on structural characteristics in Yangshui mining area of Kaiyang phosphate mine, central Guizhou[J]. Geol Chem Miner, 2017, 39(2):90-95.
- [14] 蔡兴林,张朝举,郭江波,等. 贵州开阳磷矿西翼矿区地热水成因分析[J]. 中国煤炭地质,2018,30(6):101-104,130.  
Cai X L, Zhang C J, Guo J B, et al. Geothermal water genetic analysis in Kaiyang phosphate mine west limb, Guizhou[J]. Coal Geol China, 2018, 30(6):101-104,130.
- [15] 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队. 贵州省息烽县息烽磷矿区详细勘探地质报告[R]. 遵义,2015.  
No. 114 Geological Team, Bureau of Geology and Exploration and Exploitation of Mineral Resources of Guizhou Province. Detailed Exploration Geology Report of Xifeng Phosphate Deposit, Xifeng County, Guizhou Province[R]. Zunyi, 2015.
- [16] 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队. 贵州息烽磷矿准采标高(600 m)以上井下开采与息烽温泉关系勘查论证报告[R]. 遵义,2013.  
No. 114 Geological Team, Bureau of Geology and Exploration and Exploitation of Mineral Resources of Guizhou Province. Exploration and
- Demonstration Report on the Relationship between Underground Mining above the Quasi-Mining Level (600 m) and Xifeng Hot Spring in Guizhou Xifeng Phosphate Mine[R]. Zunyi, 2013.
- [17] 王皓,柴蕊. 地热温标在地热系统中的应用研究[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2009,26(3):54-58.  
Wang H, Chai R. Application of geothermometers in the geothermal system[J]. J Hebei Univ Eng: Nat Sci Ed, 2009, 26(3):54-58.
- [18] 陈履安. 贵州热矿水热储温度的估算[J]. 贵州地质, 1995(1):69-77.  
Chen L A. Estimate of thermal reservoir temperature of thermal mineral water in Guizhou[J]. Guizhou Geol, 1995(1):69-77.
- [19] 何维,顾尚义. 黔东南变质岩区温泉水化学特征及水岩反应研究[J]. 贵州大学学报:自然科学版,2018,35(1):40-44.  
He W, Gu S Y. Hydrochemical characteristics and water-rock reaction of hot spring in metamorphic rock area of southeast Guizhou[J]. J Guizhou Univ: Nat Sci, 2018, 35(1):40-44.
- [20] 杨荣康,罗维,裴永炜,等. 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 R K, Luo W, Pei Y W, et al. Distribution and fluids hydrochemistry characteristics of hydrothermal geothermal resources in Guizhou Province[J]. Geol Surv China, 2018, 5(2):38-44.

## Discovery of geothermal nappe structure and genesis research of Xifeng hot spring in Guizhou

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, MOU Yuliang<sup>1,2</sup>, ZHU Lijun<sup>1</sup>, WANG Ganlu<sup>1,2</sup>, ZENG Bo<sup>3</sup>

(1. Guizhou University, Guizhou Guiyang 550025, China; 2. Guizhou Petroleum Society, Guizhou Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Yongtai Energy Shale Gas Development Co., Ltd, Guizhou Zunyi 564200, China)

**Abstract:** Based on the deep exploration data in phosphate ore in recent years, the authors in this research studied the geological conditions and geothermal characteristics of Xifeng hot spring in Guizhou, and put forward new understandings of geological genesis. ① The imbricate thrust-nappe tectonic system is composed of Yangshui Anticline, Anqing Fault ( $F_1$ ) and Wenquan Fault ( $F_2$ ), which constitute the main body and boundary of Xifeng hot spring geothermal water system. The surface structure and internal structure of this geothermal structure system is heterogeneous. And the new strata are covered by the old strata, which consist many overlapped thermal storage units, and these thermal storage units become good places for the formation and migration of geothermal water. ② A series of geothermal storage units are directly contacted by Anqing Fault ( $F_1$ ), and these units have close hydraulic contact, which provides good channel for water and heat. Wenquan Fault ( $F_2$ ) forms the geothermal water boundary of Xifeng hot spring. ③ The atmospheric precipitation penetrates into the deep carbonate reservoir along the fracture channel, and it becomes geothermal water after the absorption of heat. Under high temperature and high pressure conditions, the geothermal water continuously migrates to the core of Yangshui Anticline, which is preserved by the overlying strata of Cambrian clastic rocks and limited by the hot spring fault. Then the geothermal water forms a favorable geothermal resource enrichment area in the west wing and north end of Yangshui Anticline, and then is blocked by faults and exposed to the surface.

**Keywords:** geothermal structure; thrust-nappe structure; deep circulation; Xifeng hot spring

(责任编辑: 刘丹)