

doi: 10.3969/j.issn.2097-0013.2021.01.005

## 赣南地热水形成条件分析与赣县区地热水勘查靶区圈定

黄长生<sup>1</sup>, 侯保全<sup>1,2</sup>, 易秤云<sup>1,2</sup>, 李 龙<sup>1,2</sup>, 张胜男<sup>1,2</sup>, 周 耘<sup>1,2</sup>,

Waseem Akram<sup>1,2</sup>, 王芳婷<sup>1,3</sup>

HUANG Chang-Sheng<sup>1</sup>, HOU Bao-Quan<sup>1,2</sup>, YI Cheng-Yun<sup>1,2</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Sheng-Nan<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Yun<sup>1,2</sup>, Waseem Akram<sup>1,2</sup>, WANG Fang-Ting<sup>1,3</sup>

(1. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430205; 2. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

(1. Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

**摘要:**为巩固脱贫攻坚成果, 迈向乡村振兴, 赣县人民梦寐以求在赣县探测到地热水资源。本文探讨了赣南山地隆起区构造裂隙地热水形成规律, 分析了江西赣南地区地热水形成的条件: ①燕山-喜山期岩浆侵入、热液活动是热供给来源; ②红层盆地中巨厚的白垩系是储热盖层; ③元古代至早古生代浅变质岩分布区岩石受多期次构造运动作用, 裂隙发育、岩体破碎, 有利于地表水下渗, 是地下水的主要补给区; ④深大断裂是沟通深部热水汇聚的隔水/导水构造, 东西向、北西向、南北向一般断裂与深大断裂形成有利的蓄水构造; ⑤受到地球运动和近现代构造应力场作用, 赣南地区深层地下水总体由东向西运移, 并在张裂型、弯凹型和交叉型三种蓄水构造类型中汇聚。初步建立了赣南地区地热水成因模式, 提出赣南地热水分布规律是在南东盘为变质岩或花岗岩、北西盘为红层盆地的北东向深大断裂, 并且与其他方向断层交叉部位, 或者深大断裂呈弧形并向西凸出的弯凹位置。根据赣县地质特征, 提出赣县地热水资源勘查靶区是江口镇河坑村、茅店镇汶潭村和大埠乡头墩村三处。建议采用地下水运移监测、地球物理探测、水文地质钻探等技术手段进行勘查。文章为赣县区实现地热水勘查重大突破提供了科学依据。

**关键词:**赣南; 地热水; 深大断裂; 蓄水构造; 地热水靶区

中图分类号: P314

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2021)01-0064-11

**Huang C S, Hou B Q, Yi C Y, Li L, Zhang S N, Zhou Y, Akram W and Wang F T. Discussion on the Formation Conditions of Geothermal Water in Southern Jiangxi Province and the Target Area of Geothermal Water Exploration in Ganxian District. *South China Geology*, 2021, 37(1): 64-74.**

**Abstract:** In order to consolidate the achievements of poverty alleviation and move towards rural revitalization as soon as possible, the exploration of geothermal water resources is the dream of the people of Ganxian. In this paper, the formation conditions of geothermal water in southern Jiangxi Province are analyzed as follows: (1) Mesozoic-Cenozoic magmatic intrusions and hydrothermal activities are the sources of thermal supply; (2) The Cretaceous strata with considerable thickness in red bed basins are the heat storage cap

收稿日期: 2021-1-27; 修回日期: 2021-2-28; 责任编辑: 董好刚

基金项目: 江西省宁都县大塘地热水预可行勘查(工作项目编号: 2019006); 中国地质调查局项目“清江流域水文地质调查(DD20190824)”

第一作者: 黄长生(1964—), 教授级高级工程师, 博导, 主要从事水文地质、环境地质调查研究, E-mail: 185236157@qq.com

rocks; (3) Proterozoic to early Paleozoic low-grade metamorphic rocks were subjected to multiple tectonic movements, which caused them to be fractured and broken, and become the main recharge areas of groundwater with the most favorable conditions for surface water infiltration; (4) The deep faults are isolated/diversion structures that are the signs of convergence of deep hot water, they and the general faults in east-west direction, north-west direction and north-south direction form favorable water storage structures; (5) The deep groundwater in southern Jiangxi generally moves from east to west due to the actions of earth movement and modern tectonic stress field, and converges in the water storage structures of the split type, the curved-concave type and the cross type. The authors preliminarily established the genetic model of geothermal water in southern Jiangxi. The geothermal water is stored mostly in the NE-directional deep faults in which the south east plate is a metamorphic rock or granite, the northwest plate is a red bed basin, especially at the intersecting with other direction faults, or at the curved and protruding parts to the west of the deep faults. From geological perspective and surface and sub-surface conditions, it is also proposed that the target areas of geothermal water resources exploration in Ganxian County include Jiangkou Town Hekeng Village and Maodian Town Wentan Village, and that groundwater migration monitoring, geophysical exploration, hydro-geological drilling and other technical means should be used for exploration. This paper provides a scientific basis for the realization of major breakthroughs in geothermal water exploration in Ganxian County.

**Key words:** southern Jiangxi Province; geothermal water; deep fault; reservoir structure; geothermal target area

江西省已发现地热区 115 处,按形成要素可分为隆起山地型和沉积盆地型两种地热类型,分别有 112 处和 3 处;其中,赣南地区分布温泉最多,共 69 处<sup>[1-3]</sup>(图 1)。

赣南地区具有一定规模的地层为震旦系、寒武系、泥盆系、白垩系,其余地层呈零星状分布。古生界岩性主要为变质石英砂岩、千枚岩、板岩等,岩石中节理和裂隙比较发育,岩石比较破碎,节理裂隙中多被泥砂充填,部分为充水裂隙,风化层厚度一般 2~5 m。中、新生界一般为碎屑岩类,分布于各盆地,主要为砂砾岩、长石石英砂岩、粉砂岩、粉砂质页岩等,岩石胶结较好,硬度较大,节理裂隙不发育。风化作用主要发生于较软弱的泥质岩、页岩、粉砂岩中,风化厚度 0.5~3.0 m;风化物为亚砂土夹碎石,透水性一般。新生界红色碎屑岩主要为砂岩、砾岩,铁质、泥质胶结,厚度较大,透水性差。区内侵入岩发育,主要为燕山期花岗岩和加里东晚期花岗闪长岩,主要分布于西部及东南部中低山、丘陵地带,岩石风化剧烈,风化层厚度 2.0~25.92 m,风化物透水较好。

研究区位于南岭纬向构造带东段,是江西省东西向构造强烈发育的地区,也是华夏系和新华夏系

构造普遍展布的地区。褶皱构造主要有崇义—乐安复式背斜和龙南—于都复式向斜。区内深大断裂带走向为北东和北东东,有安远—鹰潭深断裂、大余—南城深断裂、寻乌—瑞金深断裂和全南—安远大断裂等。这些断裂带规模大,切割深,控制着区内中生代红盆的形成和发展,对深部热水具有隔水/导水作用。一般断裂按走向分为北东东向、近南北向、北西向和近东西向四组,是地下热水补径排的主要通道。

## 1 赣南地区地热水基本特征及形成条件

### 1.1 地热水基本特征

赣南地区 69 处地热出露点中,自然出露的温泉 52 处,地热钻井 17 处。主要分布于赣州市北部宁都—石城、东部石城—瑞金—会场—寻乌、西部崇义—上犹、南部龙南—寻乌等地区(图 1)。以中低温地热为主,孔口温度 20~40℃的地热点占比 48%;40~60℃的地热点占比 42%;60℃以上的地热点占比 10%。最高温度是宁都县湛田乡仙人井地热,钻井孔口温度为 83℃(表 1)。

地热水阴离子以  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  为主,阳离子以

$\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 为主。水化学类型主要是  $\text{HCO}_3-\text{Na}$  型,共 27 处,占比 39%,其次为  $\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$  型,共 9 处,占比 13%; $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}$  型和  $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Na}\cdot\text{Ca}$  型各 7 处, $\text{HCO}_3-\text{Ca}$  型 6 处,  $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Na}$  型 3 处。另外, $\text{HCO}_3-\text{Ca}\cdot\text{Mg}$  型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{Cl}-\text{Na}$  型、 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Ca}$  型和  $\text{SO}_4\cdot\text{HCO}_3-\text{Na}\cdot\text{Ca}$  型各 1 处,其他为混合型。

与岩浆岩有关的地热点最多,为 42 处,与变质岩有关的 28 处,与红色碎屑岩有关的 25 处。与最有利的岩石组合——变质岩+岩浆岩有关的 15 处;与岩浆岩+红色碎屑岩组合有关的 7 处,与变质岩+红色碎屑岩组合有关的 5 处,与岩浆岩+变质岩+红色碎屑岩组合有关的 2 处,与变质岩+盖层、岩浆岩+变质岩+盖层和盖层+红色碎屑岩组合有关的各 1 处。

区内地热水出露与断裂构造关系密切,地热类型绝大多数为断裂对流型,直接与断裂相关的地热点占 95%。主要受北东向、北西向和东西向断裂控制,23 处地热点受多组断裂控制,其中与北东向断

裂有关的地热点 51 个,与北西向断裂有关的地热点 17 个,与东西向断裂有关的 10 个,与南北向断裂有关的 3 个。

对区内 10 个地热点进行了循环特征研究,循环深度在 1400 ~ 2000 m 和 2000 ~ 3000 m 之间的地热点各 4 个,各占比 40%;循环深度在 3000 ~ 4000 m 之间和循环深度在 4000 m 以上的地热点各 1 个。最大循环深度 4722 m,为石城县大畚村通天寨温泉。以石英温标计算的热储温度,在 57 ~ 90 °C 之间的地热点,占比 31%;在 90 ~ 110 °C 之间的地热点占大部分,占比 53%;110 °C 以上的地热点,占比 16%,热储温度最高的是寻乌县南桥温泉,为 155 ~ 160 °C。地温梯度在 1 ~ 3 °C/100 m 的地热点,占比为 8%,3 ~ 6 °C/100 m 的地热点占绝大部分,占比为 62%,6 °C/100 m 以上的地热点,占比为 30%。水同位素研究表明,区内地热水的补给来源均为大气降水。

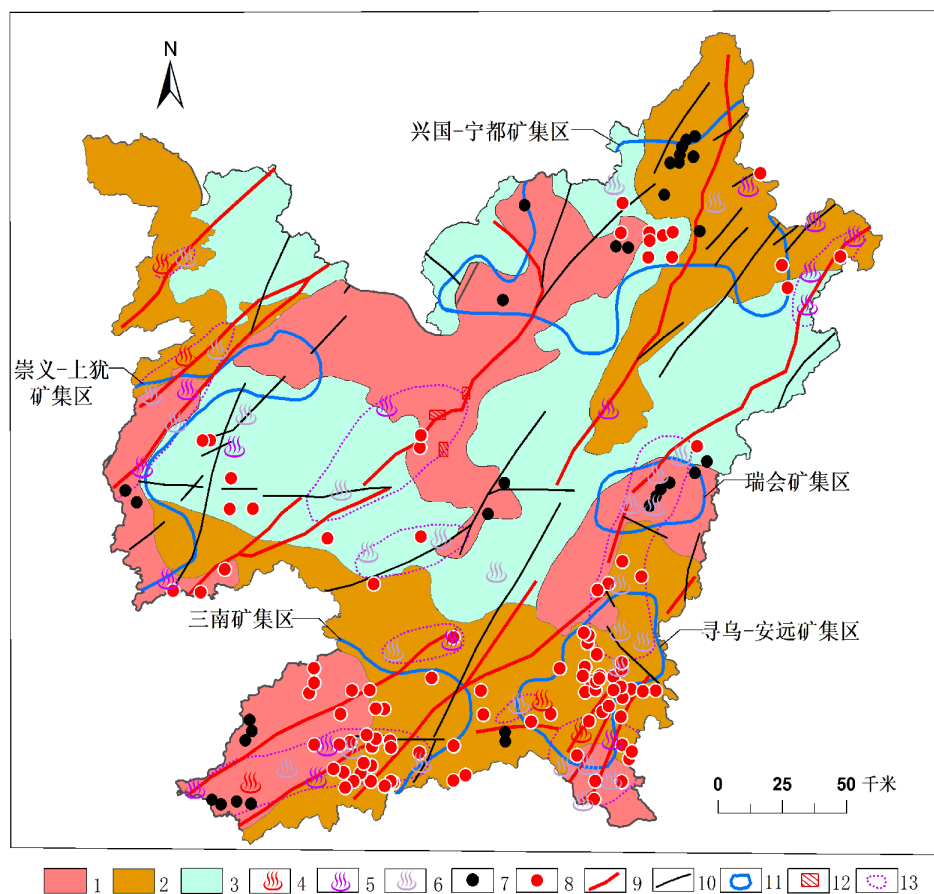


图1 赣南地热水与萤石矿集区分布图<sup>[1,3]</sup>

Fig. 1 Distribution map of geothermal water and fluorite ore concentration area in southern Jiangxi Province

1.生热率 $>4.9\mu\text{W}/\text{m}^3$ ; 2.生热率 $2.8\sim 4.9\mu\text{W}/\text{m}^3$ ; 3.生热率 $1.4\sim 2.8\mu\text{W}/\text{m}^3$ ; 4.热泉( $60\sim 90^\circ\text{C}$ ); 5.温热泉( $40\sim 60^\circ\text{C}$ ); 6.低温泉( $25\sim 60^\circ\text{C}$ ); 7.放射性热源区; 8.地震; 9.控热断裂构造; 10.重要断裂构造; 11.萤石矿集区; 12.赣县地热水勘查靶区; 13.带状热储

表1 赣南部分地热点特征一览表

Table 1 Characteristics of some geothermal spots in southern Jiangxi Province

名称	控热断裂/导水断裂	出露地层与岩浆岩	循环深度 (m)	孔口水温 (°C)	热储温度 (°C)	地温梯度 (°C/100m)	水化学类型
南迳	东西向、北西向	侏罗系、泥盆系、寒武系,燕山期岩浆岩	1440~1749	40~67	96~113	5.5	HCO <sub>3</sub> -Na
上温寮	北东向、北西向、北东向	白垩系、震旦系,加里东期岩浆岩	662~1181	21~34.5	88~99	1.1~11.2	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Na·Ca
烧水湖	北东向	南华系,加里东期花岗岩	1049~1615	41~48.5	104~107	7.9~10.8	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Na
通天寨	北东向、北西向	南华系~震旦系、白垩系	4722	23~47.1	92~108	2.1~3.7	SO <sub>4</sub> -Na·Ca
九寨	北东向转为近南北向,呈弧形展布	白垩系、震旦系	1400~1500	58~59	110	6~7	HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Na·Ca
沔坊	北北东向、北东、北西向	震旦系、白垩系	1434~2804	29.3~36.7	57~84	2.9~3.6	SO <sub>4</sub> ·HCO <sub>3</sub> -Na·Ca
渣山里	北北东	白垩系、南华系	1400~1900	18.8~32	80~98	3.7~18.8	SO <sub>4</sub> ·HCO <sub>3</sub> -Ca·Na; HCO <sub>3</sub> ·SO <sub>4</sub> -Na·Ca
樟木	北北东向	震旦系、寒武系、奥陶系和泥盆系,加里东期岩浆岩	3264~3044	40~43	132~141	3.8	HCO <sub>3</sub> -Na
热水洲	北东向、北西、近南北、近东西	寒武系、奥陶系,加里东期、燕山期岩浆岩	1674~2629	55~69.5	67~96	5.8	HCO <sub>3</sub> -Ca·Na
仙子口	北西向、北东向	寒武系、奥陶系,加里东期和燕山期岩浆岩	1488	42	67	3.1	HCO <sub>3</sub> -Ca·Na
观音坐莲	北东向、北西向	寒武系,加里东期和燕山期岩浆岩	1712	42~45	74	3.1	HCO <sub>3</sub> -Ca·Na、 HCO <sub>3</sub> -Na·Ca
汤湖	北东、北西、东西向	寒武系、奥陶系,加里东期、燕山期岩浆岩	2448	74	97	3.1	HCO <sub>3</sub> -Na
南桥	近东西向、北北东向、北东向	侏罗系、白垩系	1977~2631	28~52	155~160	5.2	HCO <sub>3</sub> -Na

## 1.2 地热水分布规律

赣南地区的地热水多沿深大断裂和断陷盆地边缘分布,地热的形成明显受断裂控制,导热断裂规模越大、延伸越长、活动越频繁、年龄越新,则地热水温度越高资源量越丰富。区内主要的控热断裂是安远—鹰潭深断裂、大余—南城深断裂、寻乌—

瑞金(邵武—河源)深断裂、遂川—德兴深断裂、黄坳大断裂和全南—安远大断裂。地热水主要分布于深大断裂向西凸出的弯凹处、多组断裂的交叉处和张性断裂带中。

赣南地区地热水形成的热源主要来自花岗岩、火山岩,盖层条件主要是红色碎屑岩,补给区主要

是变质岩区。赣南地区断陷型红层盆地与花岗岩、变质岩之间多形成深大断裂接触,当南东盘为花岗岩或变质岩地层,北西盘为巨厚红层区时,在红层和花岗岩或变质岩山的界限附近、标高较低的位置形成地热出露点。

### 1.3 地热水形成条件

#### 1.3.1 热源条件

(1)放射热:岩体的放射性生热率反映了岩体因放射性元素衰变产热能力的大小<sup>[4]</sup>,中国东南地区岩石的生热率处于较高的水平。赣南地区岩石放射性背景值较高,花岗岩的岩石生热率均值为  $3.3 \mu W/m^3$ <sup>[9]</sup>,有一半的地热能来源于放射性元素的衰变<sup>[6]</sup>。花岗岩、火山岩是区内地热水形成的主要热源。

(2)残余热:赣南地区构造带深循环地热水与萤石矿关系密切,大部分地热水附近可见萤石矿化(图1)。区内萤石矿产资源丰富,早期萤石矿床形成于燕山同造山期晚期或转型期,晚期萤石矿床形成于造山后晚白垩世的伸展环境。成矿流体为混合流体,以大气降水为主要补给来源。成矿模式为地热水环流汲取成矿,成矿温度在  $135 \sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$  之间,平均温度  $173 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>。成矿年龄均在  $70 \sim 90 \text{ Ma}$ <sup>[3,8]</sup>。萤石矿床集中产于大断裂带中,或大断裂带旁侧的次级断裂带中。萤石矿集区与地热水分布区基本重合,控矿构造与控热控水构造相同,在这些萤石矿区多有地热水出露,如渣山里萤石矿、谢坊萤石矿等。萤石矿形成年代晚<sup>[3,8]</sup>,矿床成矿的残余热是区内地热水的一个热源。

(3)构造热:近代江西处于太平洋板块向西北

俯冲作用下,邵武—河源深断裂、大余—南城大断裂主导下,赣南地区,特别是寻乌、石城一带新构造活动强烈。断层摩擦生热可以使岩石增温,且短时间内可以接近甚至超过放射性元素的产热率<sup>[9]</sup>。如地震发生时,断裂高速滑动,部分形变能转化为热能,导致断层区域温度上升<sup>[10-11]</sup>。1562年至今,赣南区域发生大于4.75级破坏性地震16次,空间分布与新构造的活动较为一致<sup>[11]</sup>,附近多有温泉出露。由此推断,构造热是周边地热水的热源之一。

#### 1.3.2 热储条件

区内存在纬向、赣南山字系、新华夏系、华夏系、南北向、北西向及旋扭构造七种构造体系或构造带<sup>[11-12]</sup>,地热水蓄水构造可分为张裂型、弯凹型和交叉型三种。

张裂型蓄水构造:是以张性断裂为含水岩带,以断层的两盘为相对隔水边界,在适宜的补给条件下能够在断层破碎带或附近相对破碎的岩体里富集和储藏地下水,如汤湖温泉、烧水湖温泉。

弯凹型蓄水构造:深层地下水渗流过程中受到具有隔水性质的深大断裂带阻隔,向弯凹处汇集,从而形成地热水蓄水的优势区域(图2),如九寨沟、渣山里温泉等。

交叉型蓄水构造:岩石受到多期构造作用,在断裂的交叉处多较破碎,从而形成一个蓄水的优势区域。区内北东向(深大)断裂与东西向、北西向等断裂组合可以形成良好的地热水蓄水空间。其中北东向断裂多为隔水性质断裂,北西向、东西向断裂多为张性含水断裂<sup>[13]</sup>,地热水受断裂带导水-隔水

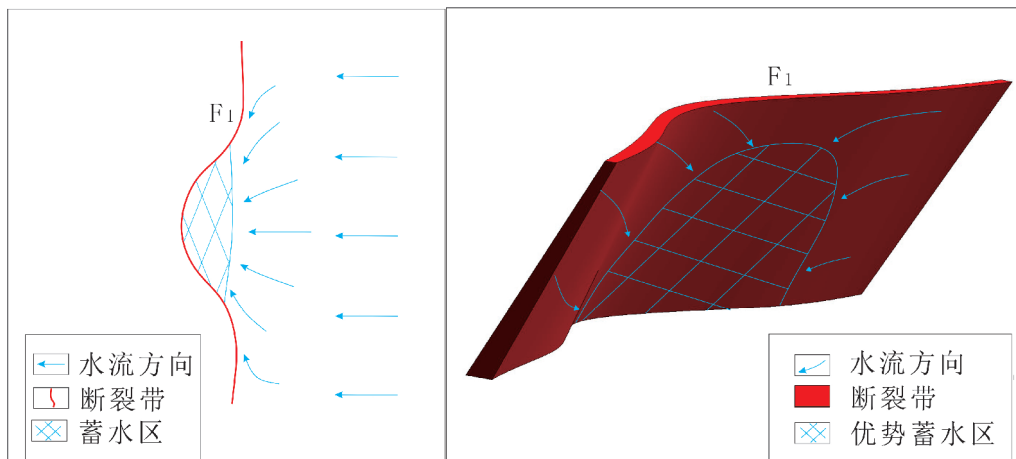


图2 弯凹型蓄水空间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of curved concave water storage space

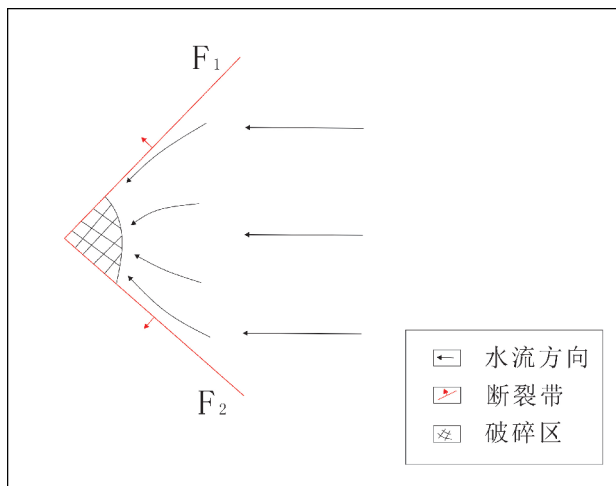


图3 交叉型蓄水空间示意图(两组)

Fig. 3 Schematic diagram of cross type water storage space (two groups)

作用,在交叉处汇集;当北东向、北西向断裂均为隔水性质断层时,深层地下水向交叉处汇流(图3)。交叉型蓄水空间是赣南地区最为普遍的类型,如热水洲温泉、观音坐莲温泉、通天寨温泉、南桥温泉和南山地热井。

### 1.3.3 盖层条件

在赣南地区,红层盆地中巨厚的白垩纪地层是重要的储热盖层。区内白垩系厚度 1000 ~ 3000 m,岩性主要为粉砂岩、泥岩、钙质铁质胶结砂砾石岩,岩层完整,受构造破坏程度低,既能够阻隔地表和近地表的冷水下渗,又能够防止热储区的热量通过气、液的形式在盖层处散失。区内盖层导热性差,导热率较低<sup>[14-15]</sup>,可对下部热源起保温作用。区内盖层越厚,热储的埋深越大,地热水的温度越高。在赣南石城地区的同一条热水带中,有白垩系盖层时水温高,无盖层时水温低,如上温寮、烧水湖温泉;盖层越厚水温越高,如九寨、通天寨、渣山里温泉(表1)。

### 1.3.4 水源补给

隆起区断裂对流型是赣南地区地热水的主要类型,主要是大气降水沿断裂破碎带、构造裂隙带渗流到深部与热源产生热交换,形成地热水<sup>[5]</sup>。氢、氧同位素分析研究表明,区内地热水的补给来源主要是大气降水<sup>[3,8,16]</sup>,但不同岩性区的补给方式不同。

变质岩区是地下热水的主要补给区,元古代至早古生代的浅变质岩受多期次构造作用,裂隙发育、岩体破碎,有利于大气降水下渗补给到地下,变质岩区构造裂隙水是赣南地区深层地热水的主要

补给来源,如热水洲、渣山里和通天寨等温泉的水化学研究表明地热水来源于变质岩区。

在花岗岩区,构造裂隙水是主要的地下水类型,大气降水通过构造裂隙入渗补给地热水。断层带的力学性质和规模不同决定了其富水性的差异,导水性、富水性在张性断裂中好,在压性断裂中差。在力学性质及补给条件相当的情况下,断层规模越大,破碎带的宽度和长度越大、切割深度越深,对地热水的补给越强<sup>[17]</sup>;红层区,由于岩层裂隙发育程度低,岩体完整性较好,不利于降水入渗,局部有封存水通过构造带补给到地热水中,如会昌温泉。

### 1.3.5 径流条件

赣南地区受近东西向的古构造应力和近北西向的近代构造应力影响<sup>[18-20]</sup>,区内褶皱基底的主体构造为近南北向或北北东向,发育有较多北东向深大断裂,如安远—鹰潭深断裂、大余—南城深断裂、寻乌—瑞金(邵武—河源)深断裂和全南—安远大断裂等。这些断裂带规模大,切割深,是地下水垂向运移的重要通道。区内分布有多个时期的地层,不同地层界面和地下的含水层是地下水水平运移的重要通道。如石城县地热点位于武夷山隆起带西侧,发育北东向寻乌—瑞金(邵武—河源)压扭性深断裂,断裂旁侧次级构造发育,该断裂切穿白垩系,是沟通地下热源的主要通道,是区内主要的导热构造。该断裂带在石城县出露有九寨温泉、烧湖里温泉、上温寮温泉等六处,该地区地热水最大循环深度为 1485 ~ 4722 m<sup>[21]</sup>。

### 1.3.6 排泄条件

赣南地区大部分的地热水均与深大断裂有关,深循环是地热水形成的重要条件。当大断裂是压性时,深循环水被拦截从而在断裂的一侧储藏,易在次级张性断裂处出露排泄;当大断裂是张性时,深循环水沿断裂带流动并在适当的蓄水构造部位储藏。多组断裂相互交错的破碎处易形成蓄水空间,并将水向低压区引导,在低压区出露成泉。区内地热水主要出露在多条断裂带交叉处、高程相对较低处、张性断裂带的高程相对较低处。

## 2 赣南地区地热水成因浅析

### 2.1 地热水循环的入渗—热交换—排泄三阶段

赣南地区主要发育断裂对流型中低温地热水

系统。这类地热系统中的地下热水需要有足够的水量和一定的循环深度<sup>[22]</sup>,才能完成水热交换过程,其形成条件与地层岩石、地质构造密切相关。地热形成的关键要素是水源区、热源区和阻水/导水深断裂。赣南断裂对流型地热水的形成过程可划分为三个阶段:一是地表水垂直入渗,补给区的地表水在重力和固体潮的作用下沿垂向构造裂隙向深部渗入、运移,完成水源补给。二是地下水水平运动及水热交换,在水平方向上,深部地下水受到固体潮的作用,沿裂隙带、含水层等导水通道由东向西运动;受构造应力场作用,由高压区向低压区运动。在水平运动过程中,流经深部岩石热源区,产生水热交换,形成地热水。三是地热水受构造带阻/导上升排泄出露成温泉。地下热水运动过程中遇到深断裂带时,如果断裂带是隔水构造,在固体潮的影响下,地热水在深断裂带一侧汇集并不断累积压力,从裂隙较发育的位置出露到地表形成温泉;如果断裂带是导水构造,地热水则沿断裂带汇集,并在低洼处出露成温泉。

## 2.2 地热水运移驱动机制

20世纪以来,固体潮对地下水的关系一直是地质学界研究的重要对象。地壳受固体潮自东向西的周期性影响下,在竖直方向上发生的形变最显著(图4)<sup>[23-38]</sup>。当引潮力自东向西作用于岩体时,岩体的应变也随之改变。在这个变化过程中,固体潮引

力作用下垂直张裂隙的开合过程为:(原状)-->(上部收窄、下部增宽)-->(上部增宽、下部收窄)-->(上部收窄、下部增宽)-->(还原)。当经历第二和第四阶段时,裂隙上部收缩、下部增宽而产生的空间变化和压力变化,驱动水体向下流动,在一、三、五阶段,水受到重力作用由地面向裂隙中补给。固体潮引起的这种裂隙空间的周期性变化,可以驱动补给区地下水的垂向运移。

断裂中的水受到这种周期性的作用,不断向深部运移,当到达深部的相对隔水层时,开始水平运移。这时候的运移通道主要是地下相对水平的含水层和岩层的界面。另外,引潮力经过的地方,会引起地壳的应力变化,从而导致含水层中水压力变化,当引潮力自东向西运动的时候,驱使含水层中的水自东向西运移。

由于地球密度差的存在,月球对地球亦存在大于零的引力梯度,也就是说月球对地壳内部的引力大于地表引力。在地势较低的排泄区,固体潮高潮期来临时,地壳固体潮形变幅度最大,由内而外(由下而上)的作用力也会使断裂底部的流体压强增大,进而使地热水上升的水力梯度变大<sup>[38]</sup>。在这种压力的驱使下,地下水从张性构造或断裂交叉周边等部位向上垂直运移。

## 3 赣县区地热水勘查靶区圈定

### 3.1 基础地质条件

赣县区位于赣州市中部,有龙南-于都复式斜和大余-南城深断裂从区内穿过。大余-南城断裂在区内呈北北东走向,性质为压性和压扭性。断裂破碎带硅化强烈,断面呈舒缓波状,带内糜棱岩发育,具有地热水形成的构造条件。

在赣县区中部,沿贡江两岸分布有第四纪地层;在大余-南城深断裂的西北侧发育了红层断陷盆地,地层岩性包括白垩系冷水坞组的杂色砂页岩、周田组的紫红色粉砂岩、泥岩和河口组的紫红色砂砾岩、砂岩以及塘边组的紫红色粉砂岩、泥岩等。在赣县区北部和东部,少量分布侏罗系、石炭系和泥盆系的泥岩、砂岩和灰岩等碎屑岩。在赣县区东部,分布有大量寒武系的板岩、硅质岩和震旦系的石英片岩、黑云斜长变粒岩等变质岩。

赣县区东南部有大面积燕山期花岗岩侵入,形

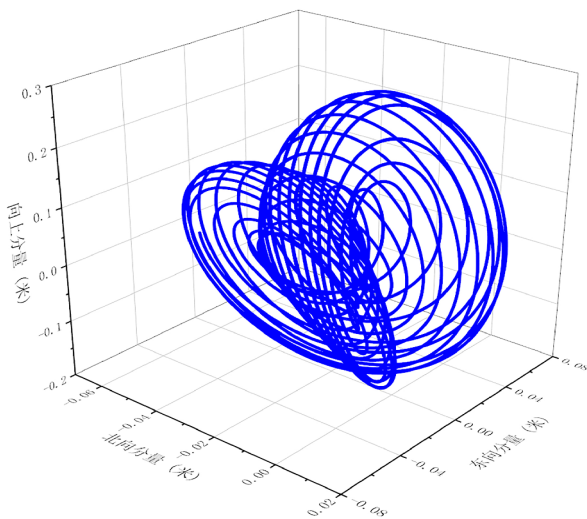


图4 地壳质点固体潮应变轨迹(赣州市2020年8月1日至15日)<sup>[38]</sup>

Fig. 4 Strain trajectory of earth tide of crustal particles  
(Ganzhou City, August 1-15, 2020)

成时代晚,主要岩性为黑云母花岗岩、二云母花岗岩等。

### 3.2 水文地质条件

赣县区地下水类型有松散岩类孔隙水、碎屑岩类裂隙孔隙水、碳酸盐类岩溶水和变质岩类、花岗岩类裂隙水等五大类。其中碎屑岩类裂隙孔隙水根据含水岩组的岩性组合和地下水的赋存特征,可划分为红色碎屑岩裂隙孔隙水和盖层一般碎屑岩裂隙孔隙水两个亚类:红色碎屑岩裂隙孔隙水含水岩组由红层盆地第三系、白垩系红色碎屑岩组成,地下水赋存空间以孔隙为主,溶隙、裂隙甚少;一般碎屑岩裂隙孔隙水含水岩组主要由侏罗系、三叠系、二叠系、泥盆系砂岩、页岩等组成。碳酸盐岩类岩溶水含水岩组主要由二叠系、石炭系灰岩、白云质灰岩、白云岩组成,岩溶较发育,覆盖型区较裸露型区富水性好,断裂带及可溶岩与非可溶岩接触带,常常富集丰富的地下水。变质岩类裂隙水含水岩组主要由震旦系、寒武系变质岩组成,岩石破碎,裂隙发育,透水性较好。花岗岩类裂隙水主要存在于加里东期、燕山期花岗岩中,裂隙较发育,透水性一般。

区内浅层地下水主要由大气降水的渗入补给,经短途径流,排泄于邻近河流后汇入贡江,具有就

地补给、就近排泄的特点。深层地下水补给区主要在大余-南城断裂带附近和东侧构造复杂区。大余-南城断裂带东侧构造活动强烈、岩体破碎、地势较高,存在有利的导水构造,是较好的深层地下水补给区。这些断裂及其附近破碎带也是浅层地下水向深层地下水运移的重要通道,岩层界面处的含水层是深层地下水水平运移的重要通道。区内的红层断陷盆地附近高程低,地下水压力差较大,盆地东侧边缘为大余-南城深断裂,并发育次一级交叉断裂,是深层地下水排泄的优势区。

### 3.3 靶区地热水形成条件分析

大余-南城断裂两侧附近发育有一系列与其近平行的次级构造。在断裂带的东侧变质岩、花岗岩分布区,构造交错纵横,有利于地表水对地下水的补给;断裂带在赣县区的江口镇河坑村和茅店镇汶潭村出现了两处弯凹,且在江口镇有近东西向断裂与深大断裂带的交叉;在大埠乡头墩村为近南北向构造、近东西向构造交叉处,附近有地热异常显示。结合 1.2 中所述,这三个地区是地热水分布的优势区(表 2,图 1)。

#### 3.3.1 热源条件

三个优势区域位于大余-南城深大断裂的中段。该深大断裂在区内呈北北东走向,性质为压性

表2 勘查优势区地热水形成条件

Table 2 Formation conditions of geothermal water in the exploration dominant area

靶区名称	热源条件	热储类型	盖层条件	地热水补给来源	径流通道	排泄方式
江口镇河坑村	构造热	弯凹型 张裂型 交叉型	西侧出露白垩系红层,渗透率和导热率均较低	大气降水经东侧寒武系变质岩区的节理裂隙和北东向断裂入渗补给	构造断面、变质岩体的节理裂隙、白垩纪地层与寒武纪变质岩接触的不整合面、近东西向断裂	向地势低洼处自然排泄
茅店镇汶潭村	放射热 构造热	弯凹型	西侧出露大面积白垩纪红层,渗透率和导热率均较低	大气降水经东侧寒武纪变质岩区的节理裂隙和北东向断裂入渗补给	构造断面、变质岩体的节理裂隙、白垩纪地层、寒武纪变质岩和燕山期花岗岩之间接触的不整合面	向地势低洼处自然排泄
大埠乡头墩村	放射热 构造热	张裂型 交叉型	燕山期花岗岩,岩体较完整,渗透率较低	大气降水经东侧寒武纪变质岩和燕山期花岗岩区的节理裂隙和北东向断裂入渗补给	构造断面、变质岩体和花岗岩的节理裂隙、寒武纪变质岩与燕山期花岗岩接触的不整合面、近东西向断裂	向地势低洼处自然排泄



和压扭性,并发育有一组近东西向的次级断裂,沿断裂破碎带硅化强烈,岩石节理裂隙发育。目前在大余-南城深大断裂与章贡区交界处已有揭露出热水的地热井,并且在区内该断裂东侧有大面积的岩浆岩出露,表明该深大断裂是导热构造,具备构造生热的条件。区内大面积出露的燕山期花岗岩,具有较高的生热率,均值可达  $4.9 \mu W/m^3$ ,可提供放射热的生热条件。三个优势区域周围分布多个萤石矿床,成矿热液活动频繁,说明区内可能有一定量的残余热存在。距离优势区域 12 km 内有两个深井,其中位于茅店镇汶潭村靶区北东约 5 km 的下坝 ZK01 勘查孔,钻进深度 920 m,测井得到的地温梯度是每百米 2.93 °C;位于茅店镇汶潭村靶区南西约 12 km 的峰山 ZK02 勘查孔,钻进深度 1280 m,孔底温度 55 °C,推算地温梯度是每百米 2.96 °C。

### 3.3.2 热储条件

江口镇河坑村位于大余-南城深大断裂走向由北东转向北北东的弧形弯凹处,同时也是深大断裂与近东西向张裂性次级断裂的交汇处,由此形成弯凹型、张裂型和交叉型三种热储空间;茅店镇汶潭村位于大余-南城深大断裂走向由北东转向北北东的弧形弯凹处,形成弯凹型热储空间;大埠乡头墩村位于大余-南城深大断裂与近东西向张裂性次级断裂的交汇处,形成张裂型和交叉型两种热储空间。

### 3.3.3 盖层条件

三个优势区域位于赣州断陷盆地的东缘,西侧出露大面积白垩系红层。红层厚度大,且出露完整,产状近水平,导热率和渗透率均较低,是赣南地区典型的地热盖层。江口镇河坑村和茅店镇汶潭村的西侧均出露大面积的白垩系红层,具有较好的盖层条件;大埠乡头墩村出露大面积燕山期花岗岩,岩体较完整,岩体层厚大,导热率低,具备盖层条件。

### 3.3.4 水源补给

靶区内的地热水补给来源为大气降水入渗补给,主要的人渗补给通道为大余-南城深大断裂所形成的断裂破碎带以及距深大断裂东侧 10~30 km 的一组北东向张性断裂,主要补给区为深大断裂东侧节理裂隙发育的变质岩区。

### 3.3.5 径流条件

大气降水经节理裂隙入渗至地下形成地下水,

在运移过程中主要有以下径流通道:①构造断面,区内发育有变质岩和沉积岩两套岩组,在东南侧武夷地块的推覆作用下,呈低角度接触,并且节理裂隙发育,是地下水有利的径流通道;②节理裂隙,靶区处于大余-南城深大断裂破碎带上,破碎带东侧的变质岩体受断裂作用,岩石较破碎,节理裂隙发育,有利于地下水下渗及径流;③不整合面,区内白垩系、燕山期花岗岩和寒武系变质岩之间接触形成的不整合面;④近东西向断裂,大余-南城深大断裂形成的近东西向次级断裂,为张性断裂,是地下水下渗与径流的有利通道。地下水向下径流形成深层地下水,在固体潮作用下,向西运移,并在深处与热源进行热交换形成地热水,最终汇集在热储空间中。

### 3.3.6 排泄条件

地热水在压力差作用下沿深大断裂向上运移,在节理裂隙处和地势低洼处排泄。贡江河床是赣县附近的侵蚀基准面,地势低洼,有利于地热水的排泄。

## 3.4 靶区圈定

综合分析赣县区地质条件,圈定赣县江口镇河坑村、茅店镇汶潭村和大埠乡头墩村等 3 处地热勘查靶区(图 1),其中茅店镇靶区地理优势尤为显著。建议通过地下水运移监测、地球物理勘探,确定水文地质钻井具体位置,建议地热孔钻进深度 1200~1500 m,按照地温梯度每百米 2.9 °C 推算,可望获得井底温度 53~61 °C 的地热水资源。

## 4 结论

(1)赣南地热水资源以断裂对流型为主,地热来源主要以放射热、残余热和构造热为主;蓄水构造类型主要有张裂型、弯凹型和交叉型三类;地热水盖层以导热率低、完整性好和厚度较大的红层为主;地下水的补给来源是大气降水,深层地下水的补给区主要是变质岩区,其次为花岗岩区;其径流通道主要是深大断裂带和不同岩层界面间形成的裂隙通道;与蓄水构造连通的张性断层或断层附近的相对导水带是排泄的主通道。

(2)赣南地区地热水的形成可以分为三个阶段:第一阶段是地表水在重力和固体潮的作用下垂

直入渗补给;第二阶段是深部地下水在固体潮的作用下,在水平方向上由东向西运动,在构造应力场作用下,由高压区向低压区运动,受到深部地热传导水温增加;第三阶段是地热水受构造带阻/导,上升出露成温泉。

(3)赣南地区地热水主要分布在深大断裂带附近,中新生代盆地边缘,且地热点及其附近分布有较大面积岩浆岩及变质岩层和白垩系红层。

(4)在赣县圈定3处地热勘查靶区,其中茅店镇最优。建议地热孔设计深度1200~1500 m,井底地热水温度可达52~61℃。

感谢江西省地质勘查基金管理中心、江西省核工业地质局、江西地矿局水文地质工程地质大队、江西省地质工程集团、江西地矿局赣南地质调查大队等单位提供资料支撑和各位专家的指导。

#### 参考文献:

- [1] 白细民,邓建军.江西省地热志[R].江西省地质环境监测总站,2015.
- [2] 王先广.江西省地质勘察基金找矿重大突破与科技创新[M].南昌:江西科学技术出版社,2020.
- [3] 徐有华.赣南萤石矿成矿地质条件及成矿预测研究[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2008.
- [4] Rybach L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(2): 309-317.
- [5] 赵平,汪集旻,汪缉安,罗定贵.中国东南地区岩石生热率分布特征[J].岩石学报,1995,11(3):292-305.
- [6] 徐慧.地热来源探秘[J].资源环境与工程,2015,29(2):237.
- [7] 中国矿产地质志编委会.中国矿产地质志·江西卷[M].北京:地质出版社,2015.
- [8] 李长江,蒋叙良.中国东南部两类萤石矿床的成矿模式[J].地质学报,1991,(3):263-274.
- [9] 瞿武林,张怀,石耀霖.剪切生热对青藏高原东南缘下地壳流形成的作用[C].//中国地球物理学会.中国地球物理2013——第七专题论文集.中国地球物理学会,2013:13.
- [10] 高雅琪,史保平.基于Chester-Higgs模型探讨摩擦生热对断层演化进程的影响[J].地震学报,2019,41(1):13-32.
- [11] 钟骏泰.赣南区域地质构造特征与地震分布关系研究[J].华南地震,2002,22(4):45-53.
- [12] 杨世文.赣南兴国-宁都成矿带萤石矿床成因[D].中国地质科学院博士学位论文,2019.
- [13] 刘光亚.基岩蓄水构造的理论与实践[J].河北地质学院学报,1981,(4):50-56+28.
- [14] 林乐夫,王安东,孙占学,万建军,李小聪,罗贤文.江西省实测地表热流值及特征 [J]. 能源研究与管理,2017,(3):91-94.
- [15] 伯慧,宋炉生,王运,夏为平,王涛涛,王鹤,周胜.江西省干热岩资源有利区优选研究 [J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2015,38(4):407-411.
- [16] 肖则佑,王进,侯怀敏.赣南东部地热水特征及成因分析[J].东华理工大学学报(自然科学版),2018,41(3):255-261.
- [17] 黄道顺.花岗岩裂隙水的赋存特征及找水要点[J].矿产保护与利用,2005,(4):51-54.
- [18] 徐则民,孙世雄.构造应力与地下水运移[J].沈阳黄金学院学报,1995,(1):42-47.
- [19] 袁利娟,孔祥军,高剑,沈鹏飞,何云成,冯浩,李文,郝伟俊.北京市延庆地热田成因模式[J].地质论评,2020,66(4):933-941.
- [20] 邹国瑶,杨倩.江西省石城县上温泉地热水成因分析[J].资源信息与工程,2019,34(5):28-30.
- [21] 刘耀,陈平杨,祝爱明,周作文,刘晓芳,余敏.石城县地热资源分布特征及开发利用研究 [J]. 矿产与地质,2016,30(5):846-851.
- [22] 白细民,叶海龙.江西省地热水资源形成模式与勘查方向探讨 [C]. //江西省地质学会.2014江西地学新进展——江西省地质学会成立五十周年学术年会论文集,2014:73-80.
- [23] 阳玲,杜金月,王同科,赵志学,郝永红.运用地下水对潮汐的响应识别压力传导系数[J].水文地质工程地质,2019,46(6):26-30+39.
- [24] 郭敏,万军伟,江峰,黄琨.用地下水潮汐效应确定潜水含水层水文地质参数[J].地球科学,2017,42(1):155-160.
- [25] 赵丹,王广才.芦山地震中川-12井地下水位固体潮与气压周期波变化 [C].//2014年中国地球科学联合学术年会——专题10:流体地球科学与巨型成矿带及重大自然灾害成因论文集,2014:68.
- [26] 兰双双.深层地下水水位动态对地震活动响应关系的研究[D].吉林大学博士学位论文,2010.
- [27] Allègre V, Brodsky E E, Xue L, Nale S M, Parker B L, Cherry J A. Using earth-tide induced water pressure changes to measure in situ permeability: A comparison with long-term pumping tests [J]. *Water Resources*

- Research, 2016, 52(4): 3113–3126.
- [28] 朱常坤, 梁杏, 刘绍华, 刘亚磊, 高业新. 利用连续小波变换方法对潜水位进行气压和潮汐改正[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3): 169–174.
- [29] Bense V F, Gleeson T, Loveless S E, Bour O, Scibek J. Fault zone hydrogeology [J]. Earth -Science Reviews, 2013, 127: 171–192.
- [30] 许闯, 罗志才, 周浩, 吴怿昊. 重力固体潮观测数据预处理的滤波方法比较[J]. 测绘科学, 2014, 39(6): 12–17+34.
- [31] Burbey T J, Hisz D, Murdoch L C, Zhang M J. Quantifying fractured crystalline -rock properties using well tests, earth tides and barometric effects[J]. Journal of Hydrology, 2011, 414: 317–328.
- [32] Elkhoury J E, Brodsky E E, Agnew D C. Seismic waves increase permeability[J]. Nature, 2006, 441: 1135–1138.
- [33] 王铁城, 王宝银. 井水位潮汐特征及其震前的异常变化[J]. 地震, 1993, (4): 1–7.
- [34] Hsieh P A, Bredehoeft J D, Farr J M. Determination of aquifer transmissivity from Earth tide analysis [J]. Water Resources Research, 1987, 23(10): 1824–1832.
- [35] 李洪. 固体潮对地下水的影响及其有关问题[J]. 水文地质工程地质, 1987, (4): 42–43.
- [36] 刘澜波, 郑香媛. 井水固体潮分析结果及其在地震预报中的应用[J]. 地震, 1985, (1): 7–12.
- [37] Bower D R. Bedrock fracture parameters from the interpretation of well tides [J]. Journal of Geophysical Research, 88(B6): 5025–5035.
- [38] 严克涛, 卢国平. 温泉流量变化反映固体潮对深大断裂导水性的影响[J]. 地质科技情报, 2017, 36(2): 229–235.