

汝城干热岩地热资源研究

龙西亭¹, 袁瑞强², 邓新平¹, 李芳¹, 皮景¹, 李红磊³

1. 湖南省地质矿产勘查开发局四〇二队, 长沙 410014
2. 山西大学环境与资源学院, 太原 030006
3. 中国电建吉林省电力勘测设计院, 长春 130022

摘要 汝城热水镇出露98℃天然热泉, 该地区深部干热岩地热资源相当可观。通过大量钻孔地温测量和大地热流测试等勘探工作, 评估了该地区干热岩地热资源的基本情况。勘探结果表明, 研究区内平均地温增温梯度为18.7℃/100 m, 最高值达35.2℃/100 m, 主要高温钻孔的大地热流量介于60~170 MW/m², 地热资源较为可观。该地热田的热源来自深部岩浆余热, 热储主要是F₁、F₃断裂带上盘及其他次级断层派生的密集裂隙系统。区内热水河以东花岗岩体为浅部水热储盖层; 热水河以西震旦系的板岩为深部热源盖层。模拟结果表明, 研究区地热田热储层下底面温度为260℃, 热储层上顶面温度为255℃, 热储层以上厚度为3500~4000 m。汝城地区热储埋藏深度较浅, 热储温度较高, 是较好的干热岩开发靶区。

关键词 干热岩; 地热资源; 大地热流; 汝城

中图分类号 P314

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.011

Hot dry rock geothermal resources in Ru County

LONG Xiting¹, YUAN Ruiqiang², DENG Xinping¹, LI Fang¹, PI Jing¹, LI Honglei³

1. The 402 Team, the Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration of Hunan, Changsha 410014, China
2. School of Environment and Resource, Shanxi University, Taiyuan 030006, China
3. Jilin Electrical Power Survey and Design Institute, Power China, Changchun 130022, China

Abstract Ru County is rich in hot dry rock geothermal resources with a 98℃ hot spring distributed. However, research on the resources is scarce. This study evaluated the hot dry rock geothermal resource in Ru County on the basis of borehole temperature measurement and terrestrial heat flow survey. The results show that the average geothermal gradient was 18.7℃/100 m with a max of 35.2℃/100 m and the heat flow changed between 60 and 170 MW/m². Heat came from the deep magma in the geothermal field. The geothermal reservoir was composed of dense fractures produced by sub-faults in the upper part of F1 fault and F3 fault. The cover of the geothermal reservoir contained exposed granite on the east side of the Reshui River and Sinian slate on the west side. According to our model, the temperature was 260℃ on the lower site and 255℃ on the upper site. The stratum thickness is about 3500~4000 m above the geothermal reservoir. In Ru County, the geothermal reservoir has a shallow burial depth and a high temperature belonging to a suitable destination area of hot dry rock development.

Keywords hot dry rock; geothermal resource; heat flow; Ru County

地球内部蕴藏着取之不尽用之不竭的地热能, 绝大部分地热能以干热岩的形式存在。而且, 与常规水热地热资源相比, 干热岩具有分布的普遍性和高热储温度而更具有开发潜力和前景^[1]。干热岩通常指埋藏于地表3 km以下、温度高于

150℃、没有水或蒸汽的热岩体。与传统可再生能源相比, 干热岩具有零污染排放、利用效率高等突出优势, 是一种清洁的可再生能源。国际地热学界和新能源学界普遍认为, 干热岩是地热作为替代能源的希望所在^[2]。据估计, 中国大陆3~

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-09-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114025101)

作者简介: 龙西亭, 工程师, 研究方向为水文地质与地热, 电子信箱: longxiting77@163.com

引用格式: 龙西亭, 袁瑞强, 邓新平, 等. 汝城干热岩地热资源研究[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 68-73.

5 km 深处干热岩资源总计为 2.5×10^{22} J^[3], 中国大陆地区 3~10 km 深度段干热岩地热资源总量为 2.52×10^7 EJ^[4], 另有估算为 2.09×10^7 EJ^[1]。尽管各估计值存在一定的偏差, 但是均反映出中国干热岩资源十分丰富, 具有极大的开发利用前景。

20 世纪末, 干热岩资源及其开发技术就得到世界各国的广泛关注, 并进行大量的研究^[5-8], 在美国的 Fenton Hill^[9]、英国的 Rosemanowes^[10,11]、日本的 Hijiori^[12,13]、瑞典 Fjällbacka^[14] 等地热田开展了持续的研究。中国开展相关研究起步较早, 但是对干热岩资源勘探和开发研究相对较少。近年来相关勘探研究和报道逐渐增多^[15-17]。许天福等^[18]介绍了增强型地热系统(EGS)在国内外研究的现状和发展趋势, 讨论了 EGS 的基本理念和关键技术。王贵玲等^[19]系统总结了目前国际干热岩工程的储层激发情况及其相关关键技术。马峰等^[20]通过 EGS 示范工程选址指标分析, 确定了中国羊八井、阳江、漳州、福州等地区为中国 EGS 潜在靶区。

中国是世界上最早开发利用地热温泉的国家之一, 但是直到目前基本上还以地热直接利用为主, 在干热岩开发利用方面相对落后。中国地质调查局 2013—2014 年组织完成了全国干热岩资源潜力评价与示范靶区研究工作, 在东南沿海地区圈定了 8 个干热岩勘查优先靶区。青海省水文地质工程地质环境地质调查院于 2014 年 6 月在青海省海南藏族自治州共和盆地地下 2735 m 处成功钻获 168℃ 以上的干热岩, 填补了中国一直没有勘查发现干热岩资源的空白。2014 年, 中国地质调查局水文地质环境地质研究所最终确定了中国第

一口干热岩科学钻探孔位设定在居里面隆起且酸性岩体分布广泛的福建漳州地区。2015 年 5 月 21 日, 干热岩科学钻探在福建漳州龙海东泗村正式启动, 标志着中国干热岩勘查开发进入实践探索阶段。

干热岩地热资源开发受到地质条件复杂、地下探测难度大、投资费用高, 钻探风险大等不利条件阻碍。加快中国干热岩地热资源开发利用, 首先要强化钻孔地温测量和大地热流测试等勘探工作, 以“摸清家底, 科学规划”^[2]。本研究依托中国地质科学院水文地质环境地质研究所大型盆地和东南沿海典型地区深部水文地质调查与综合评价项目, 对湖南汝城干热岩资源进行勘探调查和分析。

1 研究区概况

1.1 范围及自然地理条件

汝城县总面积为 2401 km², 2013 年总人口约 40 万, 隶属于湖南省东南部的郴州市, 与广东、江西两省接壤。境内以山地为主, 丘冈盆地相间, 森林覆盖率 73.69%, 属亚热带季风湿润气候区, 气候的垂直变化和地域差异比较明显。汝城地势西北高, 东南低, 为三省分水岭, 河流“水注三江”。有沅水、浙水、秀水、策水, 汇入东江, 属湘江水系; 集龙河汇入赣江; 九龙江、城溪江汇入北江。境内热水镇出露有华南地区“流量最大、水温最高、水质最好、面积最广”的天然热泉。研究区范围包括湖南省汝城县热水镇、益将乡与集龙乡, 地理坐标范围包括 113°16'E ~ 113°59'E, 25°19'N ~ 25°52'N (图 1)。

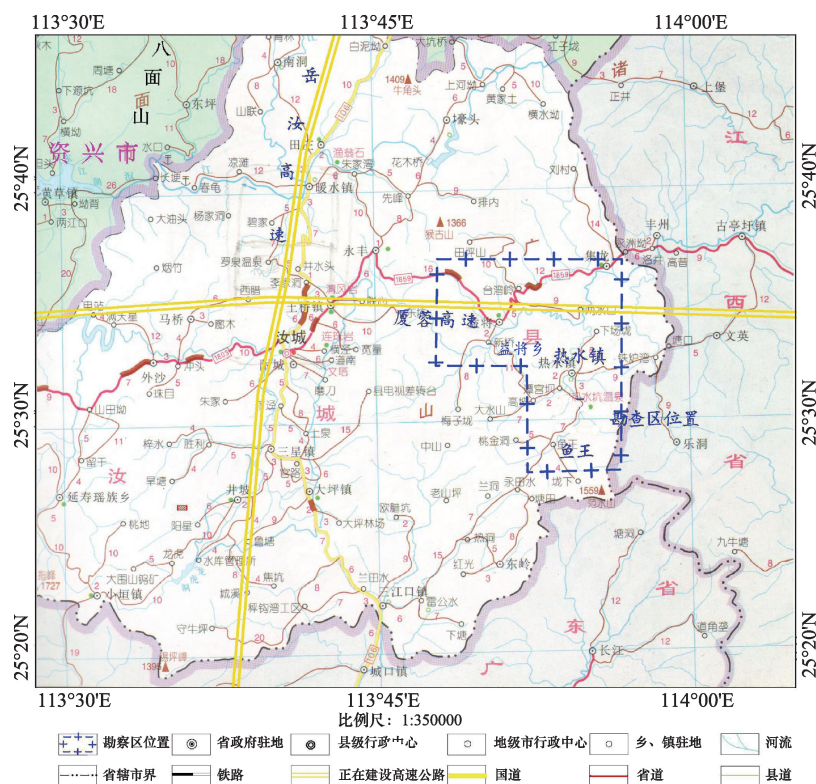


图 1 研究区位置

Fig. 1 Location of the study area

1.2 地质条件

区内地层较为发育,分布面积约380 km²,出露有前震旦系、震旦系、寒武系、泥盆系、石炭系、二叠系、白垩系和第四系,总厚度大于4063.6 m。新元古代“岭秀组”主要分布于区内热水镇、益将乡、石汉垄、高原一带,为区内最老地层。震旦系主要分布于益将—热水复背斜两翼和石汉垄、高原一带,在益将凹背和石汉垄附近出露最好。寒武系地层在区内分布广泛,主要出露在鹿井、梨花开、集垄、益将一带,与下覆震旦系地层为整合接触关系。泥盆系地层分布范围与石炭系大致相同,地层厚度均在1000 m以上。二叠系仅在西北角边缘出露,出露面积1.5 km²。白垩系地层出露于东北角非洲盆地,出露面积约为16 km²。第四系沉积分布少且零星,主要分布于集龙、益将、热水、鱼王、东岭一带的河流两侧及山洼小盆地之中,面积约18 km²。

研究区东部和南部广泛分布着诸广山东岭岩体,分布面积331 km²。同位素测定年龄值141~172 Ma,为燕山期花岗岩

岩体,与寒武系和震旦系地层呈侵入接触,接触面倾向北西,倾角较平缓,岩体与围岩接触时,发生接触变质作用。外接触带宽度200~500 m,变质成角岩、石英角岩等。

研究区断裂构造以塘湾断裂带、城口断裂带、铜坑逆冲断裂和遂川、热水(F₁)、塘洞雁列走滑断裂系等4个不同体系断裂为主体,构成NW向、NEE向、NNE向和NE向多组断裂构造相互配套、相互迁就、叠加和截切联合的构造格局,并控制了区内益将、热水、东岭、乐洞等不同构造历史阶段的花岗岩浆活动。遂川断裂、热水断裂(F₁)和塘洞断裂皆为区域性长期活动大断裂,各条断裂均呈NE—SW向延伸,长达几百公里,纵横整个湘、赣、粤边界。在研究区北部为遂川断裂;热水断裂呈NE—SW向纵贯全区;其南塘洞断裂贯于研究区东南部,是一条韧性剪切带。沿遂川、热水断裂有大量热泉出露,如上堡、丰州、热水、城口等热泉就沿其分布(图2)。据有关卫星资料反映,热水断裂是一条高地热异常带,仍在活动。

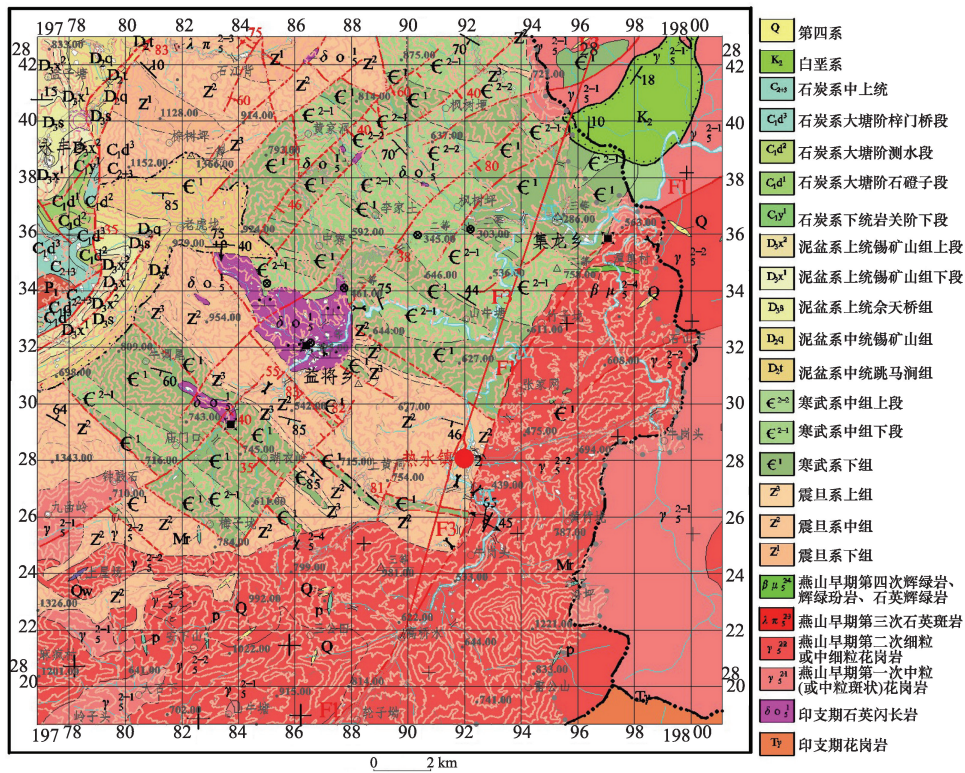


图2 研究区地质图

Fig. 2 Geological map of the study area

2 研究方法

基于已有物探资料,在区内施工多个热钻孔,对钻孔进行测温,对区内岩石进行热导率计算(式1)。编制研究区内地温梯度等值线图,分析地温梯度特征和大地热流特征。

$$q = -100K_r(dT/dz) \quad (1)$$

式中, q 为大地热流, $\mu\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s})$,通常缩写为HFU(heat flow unit); K_r 为岩石热导率, $\text{cal}/(\text{cm}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$; dT/dz 为地温梯度, $^\circ\text{C}/\text{hm}$,负号表示垂向坐标向,地表为正; T 为温度, $^\circ\text{C}$; z 为深度, m 。

测定钻孔水样中SiO₂质量浓度($C, \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)和离子含量,进行深部热储温度计算。采用无蒸汽损失的SiO₂化学温标计算公式如式(2)所示:

$$T = \frac{1309}{5.19 - \log C} - 373.15 \quad (2)$$

建立概念模型描述研究区干热岩资源分布、特征和赋存情况。利用数值模型模拟计算深部温度场,确定热储温度。

3 结果和讨论

3.1 地温场特征

根据热钻孔资料编制研究区内地温梯度等值线图(图3)。ZK1孔、ZK4孔、ZK15孔、ZK16孔、ZK19孔、ZK21孔、SK5

孔等钻孔揭露高温地下热水(出水温度84.6~92.2℃),地温增温梯度均较高(表1),最高者地温增温梯度达35.2℃/100 m,平均地温增温梯度达18.7℃/100 m,ZK14孔虽出水温度不高,但孔深293 m水温为70.1℃,下部地温增温率为1.81℃/10 m。

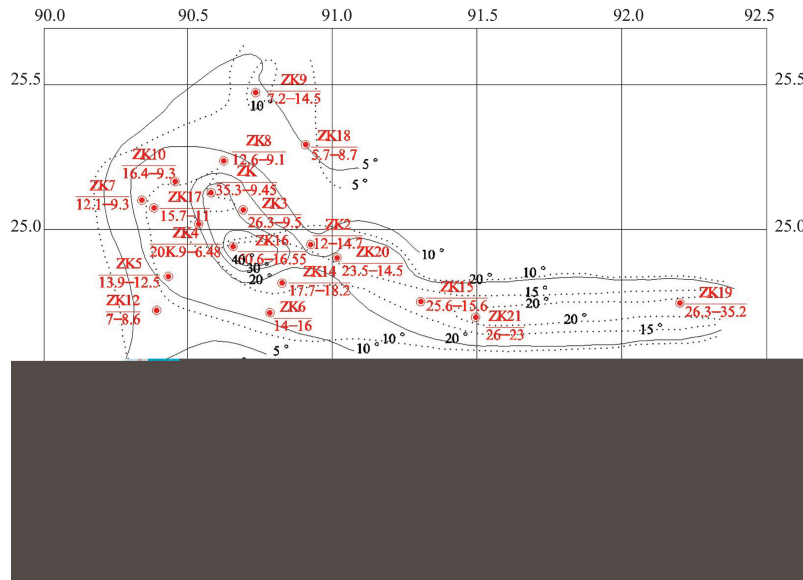


图3 研究区内钻孔位置和地温梯度等值线

Fig. 3 Location of boreholes and contour map of geothermal gradient

表1 主要钻孔地温增温率

Table 1 Geothermal gradients in some typical boreholes

孔号	地面标高/m	初见热体孔深/ m	孔内最高温 度/℃	换算后静置 水位标高/m	最大单位 涌水量/(L·(s·m) ⁻¹)	岩性	地温增温度/ (℃·(100 m) ⁻¹)
ZK1	341.91	16.20	92.2	342.53	6.52	花岗闪长岩	35.3
ZK4	341.73	11.00	91.2	342.50	6.63	花岗闪长岩	20.9
ZK16	345.52	146.80	88.3	343.21	0.09	花岗闪长岩	60.6
ZK15	369.59	219.12	83.5	345.77	0.14	花岗闪长岩	25.6
ZK21	335.08	249.70	84.6	346.56	0.10	花岗闪长岩	26.0
ZK19	372.37	161.22	88.9	340.77	0.03	花岗闪长岩	26.3
SK5	369.25	139.50	87.5	340.95	0.26	花岗闪长岩	24.5

从区域断裂来看,研究区内地温增温率高值带发育在F₁断裂带上盘,并从楼阁向热水圩的方向以大于60°的倾角向深部延伸;从地质力学来看,在F₁和F₃断裂带的上盘发育有一组与之配套的张性裂隙系统,随着主干断裂的延伸而发育,其中以走向290~320°的张性裂隙和40°~70°的张扭性裂隙最为发育,并在热水圩一带构成了节理裂隙密集带,推测深部可能有近期的岩脉侵入,蕴含着更高温度的地温能资源——干热岩资源。

根据区内钻孔水样取样测试结果,进行SiO₂化学温标计算(表2)。由表2可知,区内热储层最高者温度可达143.7℃,而且由于可溶SiO₂质量浓度往往受地表冷水混入的影响,计算结果一般偏低,因此区内实际热储层温度大于143.7℃,又计算研究区外围的广东城口地热田热储温度为106.1℃,江西汤湖地热田热储温度为118.0℃,经比对,两次热储层温度均低于研究区热储层温度,因此沿F₁主干断裂带的深部可能存

在高温热流。

湖南位于古生代前的基底隆起,整体热流值偏低,但是西南部靠近秦岭区域大地热流值较高,汝城干热岩研究区地处秦岭以北,湖南南部,受F₁、F₃两个主干断裂影响,区内大地热流值较高,为正异常,说明研究区内地壳结构和区域地质构造的组合有利于与地热的形成,存在干热岩形成条件。区内岩石热导率计算结果表明主要高温钻孔的大地热流量介于60~170 MW/m²,最高者为ZK16孔,达164.89 MW/m²(表3)。区内高温钻分布在异常区的不同部位,相隔有一段距离,距离地下热水活动中心的距离不同,受水热活动影响程度也不相同,所以对异常区的热流值有一定代表性。虽然在一定程度上热流值计算受地下热水活动影响,但还是反映出研究区内大地热流较高,构造活动频繁。此外,区内出露有98.0℃天然热泉证明了该处深部地热资源温度及规模相当可观。

表2 用可溶SiO₂浓度法计算区内热储温度结果

Table 2 Temperatures in geothermal reservoir based on soluble SiO₂ method

热泉及钻孔编号	SiO ₂ 质量浓度/(mg·L ⁻¹)	热储温度/°C
泉1	112.0	143.7
泉2	112.0	143.7
ZK1	112.5	142.1
ZK4	97.5	135.9
ZK15	46.0	107.6
ZK16	88.0	131.6
ZK19	30.0	94.2
ZK21	60.0	106.1
SK5	75.0	122.3
城口	44.0	106.1
汤湖	62.0	118.0

表3 主要地热钻孔热流值

Table 3 Heat flow in some typical boreholes

热泉及钻孔编号	岩石导热率/(W·(m·°C) ⁻¹)	地热梯度/(°C·(100m) ⁻¹)	热流值/(MW·m ⁻²)
ZK1	2.72	35.3	96.05
ZK4	2.72	20.9	56.85
ZK15	2.72	25.6	69.68
ZK16	2.72	60.6	164.89
ZK19	2.72	26.3	71.61
ZK21	2.72	26.0	70.69
SK5	2.72	24.5	66.66

3.2 深部钻探测温

ZK15 钻孔位于汝城县热水镇。孔内岩性较单一,主要为浅灰白色、浅肉红色中—细粒似斑状花岗岩。孔内最大涌水量为 2.17 L/s(降深 17.59 m),单位涌水量 0.12 L/(s·m)。孔内温度高,处温度为 28.5°C,345 m 处温度达 82.7°C(图4)。地温梯度大,全孔平均地温梯度为 172.06°C/km。且随着井深加大地温梯度呈现减小趋势。

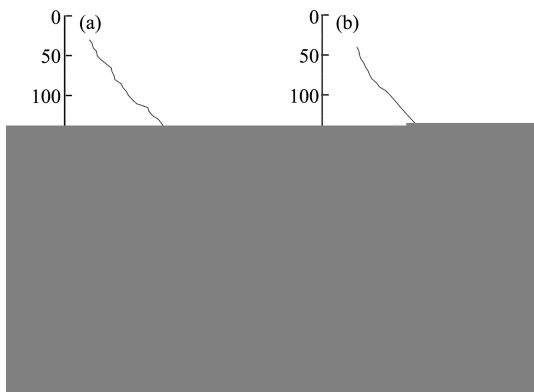


图4 ZK15钻孔(a)和ZK19钻孔(b)地温测量结果

Fig. 4 Results of geothermal gradient in boreholes ZK15 (a) and ZK19 (b)

ZK15 孔内 30~110 m 段(温度 28.5~44.7°C)地温梯度为 202.5°C/km; 110~175 m 段(温度 44.7~63.6°C)地温梯度达 290.77°C/km; 175~195 m(温度 63.6~63.6°C)地温梯度为 234°C/km; 195~245 m(温度 63.6~75.3°C)地温梯度为 234°C/km; 245~345 m(温度 75.3~82.7°C)地温梯度为 74°C/km。

ZK19 钻孔位于热水镇,孔内岩性较单一,0~6.8 m 为第四系砂卵石砾石层;6.8~146.04 m 为肉红色似斑状黑云母花岗岩;146.04~354.49 m 为断层破碎带,角砾成分为似斑状黑云母花岗岩,其中在孔深 161.02~163.52 m 为沸石脉,162.33~162.83 m 为一孔洞。孔内水量贫乏,最大涌水量为 0.76 L/s(降深 26.12 m),单位涌水量 0.03 L/(s·m)。井内温度高,40 m 处温度为 31.9°C,379 m 处温度达 88.9°C(图4)。地温梯度大,全孔平均地温梯度为 168.2°C/km,随着井深加大呈减小趋势。

ZK19 孔内 40~150 m 段(温度 31.9~55.6°C)地温梯度为 215.45°C/km; 150~165 m 段(温度 55.6~70.6°C)温度急剧增加,15 m 孔深,井温增加了 15°C,地温梯度达 1000°C/km; 165~205 m(温度 70.6~71.5°C)地温梯度为 22.5°C/km; 205~250 m(温度 71.5~83.2°C)地温梯度为 26°C/km; 250~379 m(温度 83.2~88.9°C)地温梯度为 44.19°C/km。

3.3 深部温度场概念模型

研究区以热水河为界,热水河以东为裸露花岗岩,花岗岩体本身为浅部水热热储盖层;热水河以西,为花岗岩覆盖区,上覆震旦系的板岩为深部热源盖层。在热水圩热泉附近可见大量的石英和辉沸石等热水沉积物,热水的可溶 SiO₂ 质量浓度高达 112.5 mg/L, F 质量浓度为 10 mg/L。这说明热水中的高含量 SiO₂ 除来自在高温高压状态下溶解围岩外,有一部分来源于岩浆后期的热液残余组分。同时,沸石的形成一般与花岗岩有关,花岗岩体中的钙长石、石英转变成沸石必须在高温条件下才能进行,说明热水圩地热田的地下热水的形成与岩浆余热关系密切。

用热水中可溶 SiO₂ 浓度法推算区内深部热储温度为 141.9~142.1°C,用钾钠地热温标法推算区内深部热储温度为 213.4~300.9°C,由此分析,区内地热田的深处有温度较高的热储,热储温度可能在 140°C 以上。综合分析研究区地质、物探、钻探资料,研究区热储主要是 F₁、F₃ 断裂带上盘及其他次级断层派生的密集裂隙系统。F₁ 断裂带及其上盘的张性、扭性裂隙系统在深部起着导热、导水的作用。

区内构造运动很活跃,在岩体内和围岩接触带有大量的岩脉向断裂侵入,并沿北东向断裂带有串珠状的热液石英脉,沿 F₁ 主干断裂带有片麻状花岗岩和重熔、重结晶花岗岩及黑云母呈条带状分布;普遍有钠长石化等特点,这说明花岗岩体形成之后,热液活动仍很频繁且强烈。

区内大部分断裂深切割花岗岩体,动力变质作用明显。动力变质作用初期阶段所产生的大量应力矿物——绿泥石和绢云母,由于断裂活动的不断加剧、加深,动力变质作用也随之加深加强,原来应变矿物绿泥石和绢云母已成为不稳定矿物,形成暗绿色的黑云母细条带。在断裂带内,花岗岩普遍有再熔化和重结晶的特征,再熔化作用只限于石英颗粒和

长石颗粒的交界面进行,亦即矿物生成之后,沿断裂上升的岩浆余热及深部地热作用下,其完整的长石晶体受到溶蚀而成浑圆状、椭圆状,石英圆粒化及明显的重结晶等。而中酸性岩浆岩熔融温度在600~1000℃,在温度为800℃,压力大于1000个大气压的条件下,绿泥石和绢云母才能生成黑云母,固以F₁、F₂断层为代表的华夏系断裂带具有深断裂的特征。该断裂带对于沟通燕山期早期的花岗岩余热和传导深部热能起着重要作用,并控制着区内热液活动、蚀变作用以及有关矿产的形成和分布。

3.4 深部温度场数值分析

热流体在热储层中运移,其热量的传递主要由对流和传导两种方式进行,同时,由于围岩与流体间的温度差致使其发生热交换。依据能量守恒定律可知^[21]:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho_0 C_0 v \frac{dT}{dx} - 2\alpha(T - T_c) \quad (3)$$

因为流体运移时间较长,与围岩进行充分接触,流体与岩体的热交换变化是个相当缓慢的过程,热均衡是瞬时达到的,故将流体与围岩之间的热交换忽略,即

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho_0 C_0 v \frac{dT}{dx} \quad (4)$$

此外,流体经过多年的加热运移,达到平衡后可将其视为稳态,即在流体运移过程中可不必考虑热对流,式(4)变为

$$K \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \rho_0 C_0 v \frac{dT}{dx} = 0 \quad (5)$$

式中, ρ_1 、 C_1 分别为岩石与流体混合物的密度及比热; K 为岩石与流体混合物的热导率; v 为流体的运移速度; ρ_0 、 C_0 分别为流体的密度及比热; α 为围岩与流体的热交换系数; T 为岩石与流体混合物的温度; T_c 为围岩的温度; t 为时间; z 为垂向深度。

模拟结果表明,热储层下底面温度为260℃,热储层上顶面温度为255℃,热储层以上厚度约为3500~4000 m。汪集旻等^[1]指出近期应着眼于4~7 km深度段干热岩地热资源的开发,热储目标温度是150~250℃。汝城地区热储埋藏深度较浅,热储温度较高,是较好的干热岩开发靶区。

4 结论

1) 研究区地热钻孔出水温度介于84.6~92.2℃。地温增温梯度均较高,最高地温增温梯度达35.2℃/100 m,平均地温增温梯度达18.7℃/100 m。受F₁、F₂两个主干断裂影响,区内大地热流值较高,为正常,主要高温钻孔的大地热流量介于60~170 MW/m²之间,最高者为ZK16孔,达164.89 MW/m²。结合区内出露的98.0℃天然热泉推断该处深部地热资源温度及规模相当可观。

2) 研究区地热田的热源来自深部岩浆余热,热储主要是F₁、F₂断裂带上盘及其他次级断层派生的密集裂隙系统。F₁断裂带及其上盘的张性、扭性裂隙系统在深部起着导热、导水的作用。该区内热水河以东为裸露花岗岩,花岗岩体本身为浅部水热储盖层;热水河以西,为花岗岩覆盖区,上覆震旦系的板岩为深部热源盖层。

3) 模拟计算结果表明,研究区地热田热储层下底面温度

为260℃,热储层上顶面温度为255℃,热储层以上厚度约为3500~4000 m。

参考文献(References)

- [1] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[M]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[M]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 25-31.
- [2] 黄少鹏. 中国地热能源开发的机遇与挑战[J]. 中国能源, 2014, 36(9): 4-8.
Huang Shaopeng. Opportunity and challenges of geothermal development in China[J]. Energy of China, 2014, 36(9): 4-8.
- [3] 蒯文静, 刘志明, 王婉丽, 等. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, et al. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. Geology of China, 2013, 40(1): 312-321.
- [4] 蒯文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 807-811.
Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma feng, et al. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(5): 807-811.
- [5] Goff F, Decker E R. Candidate sites for future hot dry rock development in the United States[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1983, 15(1-3): 187-221.
- [6] Whetten J T, Dennis B R, Dreesen D S, et al. The US hot dry rock project[J]. Geothermics, 1987, 16(4): 331-339.
- [7] Lim J S, Bejan A, Kim J H. Thermodynamics of energy extraction from fractured hot dry rock[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 1992, 13(1): 71-77.
- [8] Zaigham N A, Nayyar Z A. Renewable hot dry rock geothermal energy source and its potential in Pakistan[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(3): 1124-1129.
- [9] Brown D W, Duchane D V. Scientific progress on the Fenton Hill HDR project since 1983[J]. Geothermics, 1999, 28(4-5):591-601.
- [10] Richards H G, Parker R H, Green A S, et al. The performance and characteristics of the experimental hot dry rock geothermal reservoir at Rosemanowes, Cornwall (1985-1988)[J]. Geothermics, 1994, 23(2): 73-109.
- [11] Parker R. The Rosemanowes HDR Project 1983-1991[J]. Geothermics, 1999, 28(4/5): 603-615.
- [12] Kuriyagawa M, Tenma N. Development of hot dry rock technology at the Hijiori test site[J]. Geothermics, 1999, 28(4-5): 627-636.
- [13] Yanagisawa N, Matsunaga I, Sugita H, et al. Temperature-dependent scale precipitation in the Hijiori Hot Dry Rock system, Japan[J]. Geothermics, 2008, 37(1): 1-18.
- [14] Wallroth T, Eliasson T, Sundquist U. Hot dry rock research experiments at Fjällbacka, Sweden[J]. Geothermics, 1999, 28(4-5): 617-625.
- [15] Zeng Y C, Su Z, Wu N Y. Numerical simulation of heat production potential from hot dry rock by water circulating through two horizontal wells at Desert Peak geothermal field[J]. Energy, 2013, 56(7): 92-107.
- [16] Chen J, Jiang F. Designing multi-well layout for enhanced geothermal system to better exploit hot dry rock geothermal energy[J]. Renewable Energy, 2015, 74(2): 37-48.
- [17] Zhao Y, Feng Z, Xi B, et al. Deformation and instability failure of borehole at high temperature and high pressure in hot dry rock exploitation[J]. Renewable Energy, 2015, 77(2): 159-165.
- [18] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. Technology progress in an enhanced geothermal system (hot dry rock) [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(32): 42-45.
- [19] 王贵玲, 马峰, 蒯文静, 等. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 103-107.
Wang Guiling, Ma Feng, Lin Wenjing, et al. Reservoir stimulation in hot dry rock resource development[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(11): 103-107.
- [20] 马峰, 孙红丽, 蒯文静, 等. 中国EGS示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 41-47.
Ma Feng, Sun Hongli, Lin Wenjing, et al. Target site selection and index matrix evaluation of EGS trial project in China[J]. Science & Technology Review, 2015, 33(8): 41-47.
- [21] 陈墨香, 汪集旻, 邓孝. 中国地热资源: 形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Geothermal energy in China: Formation characteristics and potential assessment[M]. Beijing: Science Press, 1994.

(责任编辑 吴晓丽)