

# 湖南浏山岩体干热岩地质特征及资源潜力

叶见玲, 曾琳, 杨汉元

(湖南省煤田地质局油气资源勘探队, 湖南长沙 410014)

**[摘要]**为深入查明湖南浏山岩体干热岩地质特征及资源潜力, 本文通过利用野外地质调查、岩矿测试及生热率计算方法, 对浏山岩体的区域地质和地热地质背景进行了研究。研究发现该区存在较大规模的花岗岩岩基, 且岩体生热率及放射性热均较高, 地表高热异常, 具备干热岩赋存地质条件。在此基础上, 利用体积法初步对该区2~6 km岩体进行了资源估算, 结果显示, 湖南浏山岩体干热岩资源量为 $33.50 \times 10^{17}$  kJ, 折合1143.39亿吨标准煤。研究表明, 浏山岩体具备良好的干热岩地热地质条件及资源潜力。

**[关键词]** 浏山岩体 干热岩 地质特征 资源潜力 湖南

**[中图分类号]** P314 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2019)05-07

Ye Jianling, Zeng Lin, Yang Hanyuan. Geological characteristics and resource potential of hot dry rock in the Weishan pluton of Hunan Province [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(5): 1287-1293.

## 0 引言

干热岩一般指埋深数千米、温度在 $150^{\circ}\text{C}$ ~ $650^{\circ}\text{C}$ 之间, 由结晶岩类岩体和变质岩组成的没有水或蒸汽的高温岩体。其主要用途是在不渗透的干热岩体内形成热交换系统, 并通过热交换及地面循环装置进行发电 (Smith, 1973; Tenzer, 2001; 李德威和王焰新, 2015)。作为一种新兴能源, 其利用空间非常广泛, 整个开发过程都是在一个封闭的系统内进行, 没有硫化物等有毒、有害物质或堵塞管道的物质, 无任何环境污染 (Armstead and Tester, 1987; 耿莉萍, 1998), 开发潜力很大。

作为一种清洁可再生新型能源, 干热岩分布较广, 资源潜力巨大。现阶段, 国内已有多名专家学者利用多种研究方法对我国干热岩资源量进行了评估。例如汪集旻等 (2012) 利用体积法估算了我国大陆3~10 km深资源为 $20.9 \times 10^{24}$  J, 合计 $714.9 \times 10^{12}$  t标准煤。按2%利用率, 相当于水热型地热资源量的168倍。有关专家 (藺文静等, 2012, 2013; 王贵玲等, 2017, 2018; 许天福等, 2018) 估算我国大陆3.0~10.0 km深干热岩资源为 $2.5 \times 10^{25}$  J, 合计860万亿吨标准煤, 按2%可开采资源计算, 相当于

我国目前能源消耗总量的5200倍, 开发前景广阔。

湖南能源利用以电力、煤炭为主, 但省内没有形成规模化的化石能源勘查与开发格局, 油、气资源完全依赖于外部供给。根据最近湖南省产业发展需求及经济社会发展规划, 预计到2020年末, 天然气消费量将达到85亿 $\text{m}^3$ , 而目前管输能力仅为49亿 $\text{m}^3$ , 相差36亿 $\text{m}^3$ 的供应缺口。经济的快速发展与能源的供给量存在严重的不均衡性。

湖南省地热勘察基础好, 早在20世纪80年代初, 前人在湖南宁乡寻找地热就获得了较好的成效, 查明宁乡灰汤水温高达 $88^{\circ}\text{C}$ ~ $91^{\circ}\text{C}$ , 深部钻孔水温 $90^{\circ}\text{C}$ , 最高达 $100^{\circ}\text{C}$ , 并认为宁乡灰汤温泉主要来源于深部浏山花岗岩体, 热源类型主要为深部岩浆岩余热, 其次是构造应力释放转化的热能和深部放射性物质蜕变产生的热能<sup>①②</sup>。1971年, 前人在湖南浏山灰汤区联合勘探圈定异常范围 $8\text{km}^2$ , 于1975年建成了省内第一座地热试验电站 (叶慰平, 1986)。灰汤温泉是目前勘查发现的省内第二高温温泉, 温度达 $150^{\circ}\text{C}$ 以上, 其下部浏山岩体岩性为致密完整的岩浆岩热岩体, 具有巨大的开发潜力 (帅焕等, 2017)。

近年来, 通过对全省干热岩资源调查评价初步

[收稿日期] 2018-05-03; [改回日期] 2019-04-02; [责任编辑] 陈伟军。

[基金项目] 湖南省国土资源厅地质勘查项目基金 (编号: 201703007) 资助。

[第一作者] 叶见玲 (1985年-) 女, 硕士, 工程师, 主要从事能源地质及地热地质研究。E-mail: 50316961@qq.com。

研究,发现湖南省宁乡县洩山存在高的地热异常,深部可能具有合适干热岩体,该地区被选为干热岩有利目标区。本文采用区域地质调查、地球物理勘探、测试分析等多方法手段,对研究区地热地质条件及干热岩资源前景进行综合分析(张森琦等,2018),为湖南省下一步干热岩资源开发利用提供理论基础依据,为省内能源发展做出一定的贡献。

## 1 地质概况

洩山复式花岗岩体是湖南最大的花岗岩体之一,地处湖南宁乡县、韶山市和安化县的交界处,面积约 1240 km<sup>2</sup>(图 1)(湖南省地质矿产局,1988),主要由印支期、燕山早期侵入体及岩脉组成。岩体

出露呈不规则的长椭圆状,走向近于北西西向,构造上处于云雾山-韶山复式背斜的核部。印支期岩体面积大于燕山期岩体面积,两者岩性主要为细-中粒斑状黑云母二长花岗岩。多年来,许多学者对其同位素年龄进行了测定(丁兴等,2005,2012),最终将印支期同位素年龄定为 164~159Ma,燕山期为 20~196Ma(湖南省地质调查院,2017)。洩山岩体侵入前寒武纪板溪群碎屑沉积岩层中,并致使后者在接触带上发生热液蚀变,蚀变带宽 500~1000m。岩体周围另有晚古生代-早中生代等不同时期的沉积地层分布。区内发育有多条北东向、北北东断裂,是公田-宁乡-新宁深大断裂(F3)的一部分。深大断裂与地震密切相关,提供热源特征(康方平等,2017;杨立

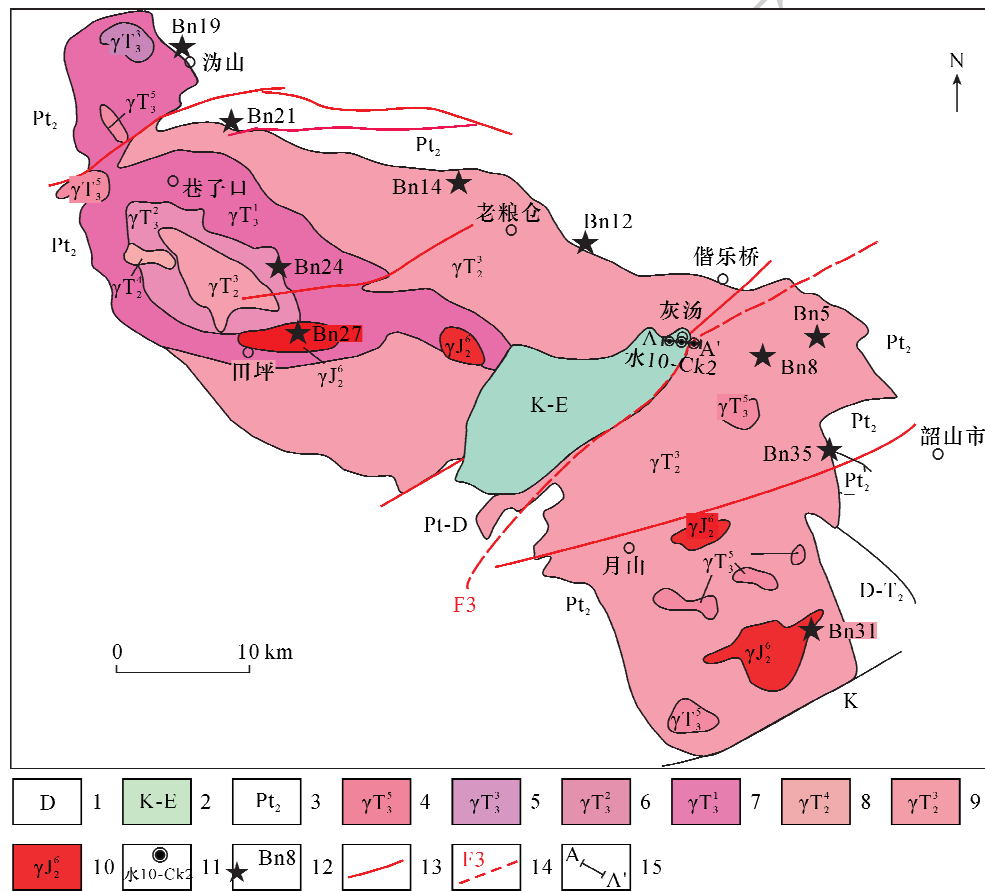


图 1 洩山岩体区域地质图(据湖南省地质调查院,2017 修改)

Fig.1 Regional geologic map of the Weishan pluton(modified from Hunan Institute of Geological Survey,2017)

1-泥盆系;2-白垩系-古近系;3-板溪群;4-印支期细粒二云母二长花岗岩;5-印支期中粒斑状二云母二长花岗岩;6-印支期粗粒斑状二云母二长花岗岩;7-印支期中粒斑状黑云母二长花岗岩;8-印支期细粒斑状黑云母二长花岗岩;9-印支期中粒斑状黑云母二长花岗岩;10-燕山期细粒二云母二长花岗岩;11-钻孔位置;12-采样点;13-断层;14-推测深大断裂;15-剖面位置

1-Devonian system;2-Cretaceous-Palaeogene;3-Banxi Group;4-Indosinian fine-grained two mica monzonitic granite;5-Indosinian medium-grained porphyritic two mica monzonitic granite;6-Indosinian coarse-grained porphyritic two mica monzonitic granite;7-Indosinian medium-grained porphyritic biotite monzonitic granite;8-Indosinian fine-grained porphyritic biotite monzonitic granite;9-Indosinian medium-grained porphyritic biotite monzonitic granite;10-Yanshanian fine-grained two mica monzonitic granite;11-drilling hole location;12-sampling site;13-fault;14-inferred deep fault;15-location of profile

中等,2017),经前人钻孔揭露及剖面推测(常璐,1987),F3断裂作为主要的导热和控热断层贯穿整个研究区,是区内导水、导热、储热构造。且该断裂灰汤段上覆白垩系砂砾岩、下伏糜棱岩作为隔热隔水层,对深部地热起到了较好的保护作用。

## 2 干热岩地热地质特征

## 2.1 干热岩体

合适的干热岩体应具备规模大、放射性元素含量相对高的特征(藺文靜等,2016)。汾山岩体具有一定的规模,岩体的风化剥蚀程度较低,所以捕掳体和残留顶盖较发育,各种岩脉也很发育,较新鲜的基岩露头比较普遍。大地电磁和重力剖面显示,灰汤

镇西南部晚白垩世红层以下存在隐伏岩体,且与宁乡灰汤白垩系分布区的 200m 以下燕山期隐伏岩体呈连通状态。

## 2.2 地温场特征

通过对区内已有钻孔资料(表 1)进行汇总分析,计算了宁乡汤山附近地温梯度。从表 1 中可以看出,除了公田-灰汤-新宁深大断裂带(F3)通过的水 14 孔、水 10 孔、水 1 孔以外,其他孔计算的地温梯度均较低,一般在  $1.20/100\text{ m}^{\circ}\text{C} \sim 1.89^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ ,低于正常地温梯度范围。当 F3 断裂通过后,钻孔地温增高(图 2),地温梯度明显增大(图 3),平均地温梯度为  $19.20^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。在灰汤段内,钻探测温及水文地质实验等资料表明,高温带

表 1 洸山岩体及周边区块地温梯度表

Table 1 Geothermal gradient of the Weishan pluton and its surrounding area

| 钻孔编号      | 孔深(m) | 温度(℃) | 孔深(m)  | 温度(℃) | 地温梯度(℃/100m) |
|-----------|-------|-------|--------|-------|--------------|
| 2203 孔    | 60    | 17.2  | 841    | 26.9  | 1.24         |
| ZK403 孔   | 60    | 19.2  | 563    | 25.5  | 1.25         |
| ZK27403 孔 | 60    | 20.3  | 510    | 25.7  | 1.2          |
| ZK001 孔   | 40    | 20.7  | 580    | 28.3  | 1.41         |
| 6603 孔    | 60    | 19.7  | 948    | 36.1  | 1.84         |
| 7404 孔    | 60    | 18.5  | 940    | 35.1  | 1.89         |
| 水 14 孔    | 30.81 | 26    | 599.69 | 99    | 12.8         |
| 水 10 孔    | 21.34 | 28.3  | 340.61 | 85.3  | 17.9         |
| 水 1 孔     | 26.63 | 30    | 190.47 | 74.2  | 26.9         |

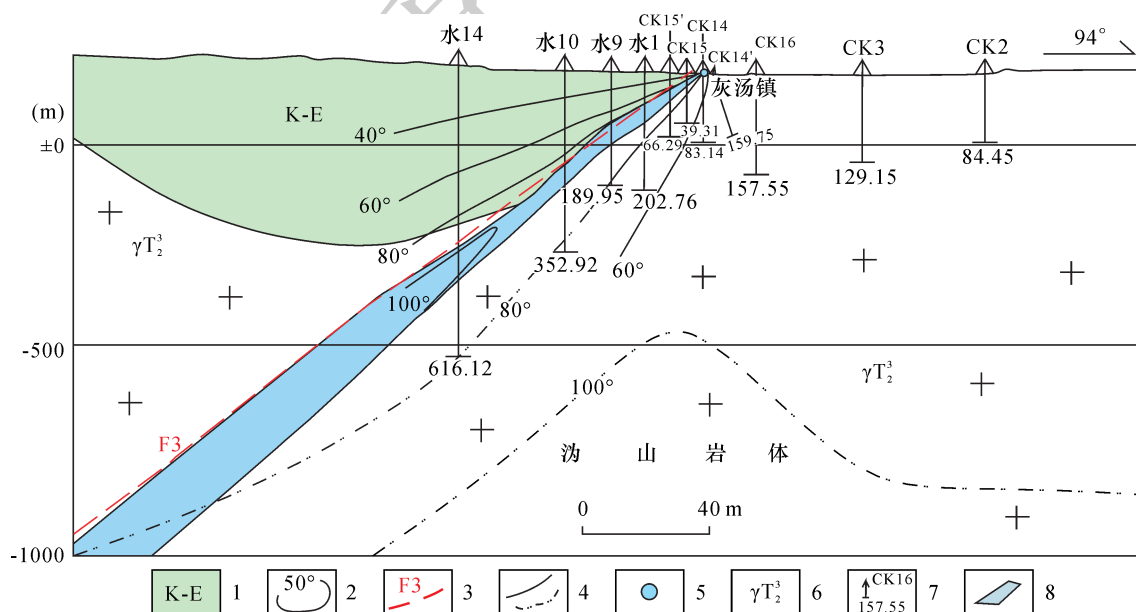


图2 宁乡县灰汤地热田 A-A'水文地质剖面图

**Fig. 2 A – A' hydrogeological section of the Huitang geothermal field in Ningxiang County**

1 - 白垩系 - 古近系; 2 - 等温线及温度; 3 - 推测深大断裂; 4 - 实测及推测温度曲线; 5 - 地面温泉点; 6 - 印支期花岗岩; 7 - 钻孔号及孔深 (m); 8 - 地下热水体边界

1 – Cretaceous – Palaeogene; 2 – isotherms and temperatures; 3 – inferred deep fault; 4 – measured and estimated temperature curve; 5 – ground hot spring spot; 6 – Indosinian granite; 7 – drilling number and depth (m); 8 – geothermal water body boundary

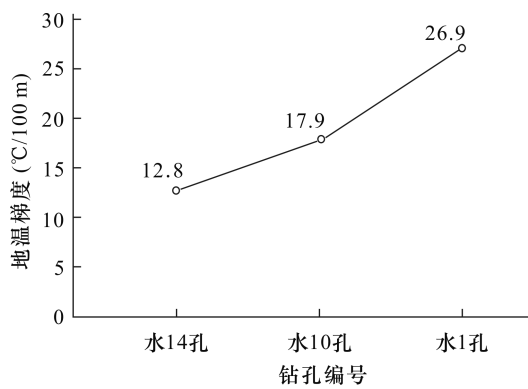


图3 F3断层通过水域后钻孔地温梯度图  
Fig.3 Geothermal gradient diagram of borehole after F3 fault passing through water

在平面上与该断层走向一致,在剖面上等温线包围着该断裂,凡在该岩体上遇到该断裂带的钻孔热量丰富,孔之间水连通良好,近断裂带位置温度最高,穿过断裂带后再向深部钻井,井温则降低。上述事实证明,F3深大断裂是控制本区热异常和控制热水的主要因素,是灰汤段内的热中心带,是地下热水的主要通道及存储空间。

2.3 大地热流

大地热流参数体现地球内部的热状态,是评价区域地热资源潜力的必要参数(姜光政等,2016;张超等,2018)。湘中为桂湘早古生代陆缘沉降带,以较低的热流值为特征,与西侧的江南造山带相近,但与东侧的华南造山带差别较大,相对而言,大地热流值明显偏低。利用已有的数据库热流值、钻孔测温资料与实测岩石热导率数据,进行了大地热流的计算。数据表明,区内深部地壳结构与区域地质构造有很好的对应关系,估算的大地热流值基本与湖南省实际热流值相接近。通过分析认为,该区热流值为45~60mW/m<sup>2</sup>。实测值低于区域背景值(图4)。

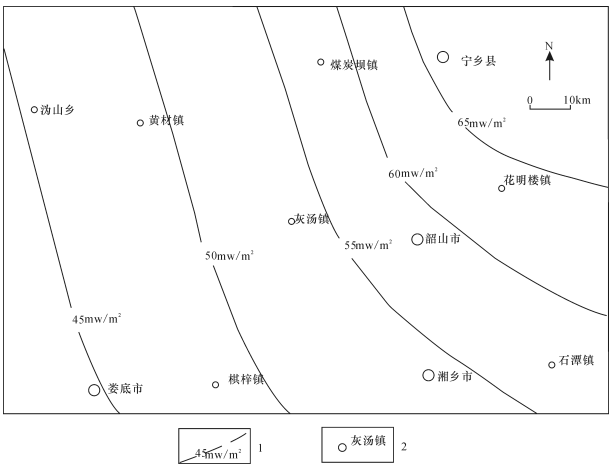


图4 研究区大地热流分布示意图  
Fig.4 Distribution sketch map of heat flow in the research area  
1 - 大地热流等值线;2 - 地名  
1 - terrestrial heat flow contour;2 - place name

2.4 岩石热物性及放射性特征

岩石的热物理性决定一个地区的地温状况,对于这个区深部地热和地热历史恢复来说,岩石生热率和导热率是不可缺少的参数,起着关键性的作用。现阶段,对于岩体的生热能力评价,国内学者一般采用体积生热率评价(赵平,1993;邱楠生,2002;黄昌旗等,2018)。本文通过采集浏山岩体具有代表性的花岗岩样品进行了岩石热物性及放射性U、Th、K等实测分析(图1)。并利用生热率公式(1),进行了岩石生热率计算。

$$H = 0.01\rho(9.52C_U + 2.56C_{Th} + 3.48C_K) \quad (1)$$

式中, $H$ 为平均生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ), $\rho$ 为密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), $C_U$ 、 $C_{Th}$ 、 $C_K$ 分别为铀、钍、钾的丰度值。

通过计算得出,生热率最高值为4.89 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,最低值为2.11 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,平均值为3.41 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ (表2),说明浏山岩体为高生热区(生热率超过2.8 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 为高生热区,赵平,1995),该岩体具备一定的生热潜力。

表2 浏山花岗岩体放射性元素测试表  
Table 2 Radioactive element test results of the Weishan pluton

| 样品编号 | 铀( $\times 10^{-6}$ ) | 钍( $\times 10^{-6}$ ) | 钾(%) | 密度( $\text{t}/\text{m}^3$ ) | 生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ) | 平均生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ) |
|------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| BN5  | 4.83                  | 18                    | 4.56 | 2.65                        | 2.86                            |                                   |
| BN8  | 4.99                  | 16.1                  | 4.04 | 2.58                        | 2.65                            |                                   |
| BN12 | 5.07                  | 8.07                  | 3.55 | 2.6                         | 2.11                            |                                   |
| BN14 | 6.39                  | 23.4                  | 3.63 | 2.66                        | 3.55                            | 3.41                              |
| BN19 | 4.7                   | 16.6                  | 3.93 | 2.69                        | 2.71                            |                                   |
| BN21 | 7.96                  | 23.6                  | 3.2  | 2.6                         | 3.83                            |                                   |
| BN24 | 10.7                  | 18.9                  | 5.47 | 2.6                         | 4.4                             |                                   |

续表 2

Continued Table 2

| 样品编号 | 铀( $\times 10^{-6}$ ) | 钍( $\times 10^{-6}$ ) | 钾(%) | 密度( $\text{t}/\text{m}^3$ ) | 生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ) | 平均生热率( $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ) |
|------|-----------------------|-----------------------|------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| BN27 | 4.51                  | 17.6                  | 4.08 | 2.59                        | 2.65                            |                                   |
| BN31 | 9.73                  | 25                    | 4.19 | 2.6                         | 4.45                            | 3.41                              |
| BN35 | 9.29                  | 31                    | 4.46 | 2.67                        | 4.89                            |                                   |

注:测试单位:湖南省勘测设计院;测试时间:2018年3月5日。

## 2.5 热源

地热的主要来源有:地幔物质转化为岩石圈时所释放的热,如现代岩浆活动所形成的岩浆房;通过深大断裂及其派生构造所形成热气包的热,岩浆含有1%~8%以水为主的其他气体;放射性元素的衰变热及深部增温等,其中深部增温是地壳内部形成干热岩的主要热源。

前人通过对研究区的温泉分布、地震、构造的内在成因关系进行了研究分析,认为宁乡灰汤白垩系局部存在干热岩,且该区热源主要是岩浆活动、地热增温、岩浆岩余热以及放射性元素衰变产生的热量(王春林,1999)。

结合前人对研究区区域地质特征及水文地质特征的研究,本次对温泉水质进行了测试分析,该区岩性及温泉放射性元素含量高,综合分析说明该区的热源主要为岩浆岩余热,沿F3深大断裂通过地下水带到浅部,其次为放射性元素的衰变热,深部增温和构造运动产生的热量较少。

## 2.6 盖层

较好的盖层可以保存储热层热量的散失。一般来说,岩石热导率小、岩石致密、裂隙少的地层可作为干热岩热储层的良好盖层(李德威和王焰新,2015;汪集旸,2015)。通常认为盖层岩性为沉积岩或火山岩,有时候岩石上合适厚度的风化壳层亦可作为储热层的盖层(蔺文静等,2015,2016)。

浏山岩体周围多为板溪群沉积岩及与岩浆岩接触带硅化、角岩化的围岩,具有厚度大、低导热率、透水性差的特征,具有较好的隔水保温的地质环境。经本次对浏山岩体盖层岩性进行热导率测试分析,位于岩体西北部的元古界板溪群沉积岩导热率为 $0.98 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$ ,厚度在200 m以上。第四系黄土、亚粘土层导热率为 $1.85 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$ ,厚度为0~312 m,为较好的盖层。而浏山岩体本身,在地表风化后形成了一层导热率较低的风化残积层,导热率较低,透水性较差,局部厚度达150 m,具备盖层条件。

在浏山岩体内部的宁乡灰汤地热区上部由透水性很弱的白垩系泥岩、泥质砂岩层覆盖于F3深大断

裂和花岗岩之上,是灰汤地热区上部隔热层。经测试分析,其导热率是 $1.30 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{k}$ ,比较低,且厚度达200 m,可以作为较好的盖层。其次经钻探揭露在该断裂带下部的糜棱岩厚度约达100 m左右,透水性弱,成为断裂带下部隔水层,亦能对岩体深部地热起到很好的保护作用,故该地热区具备较好的盖层条件。

## 3 资源潜力

### 3.1 估算方法及参数选取

本文利用体积法估算了宁乡浏山岩体干热岩地热资源量,体积公式如下:

$$Q = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T - T_c) \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为岩石密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ;  $C_p$ 为岩石比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $V$ 为岩石体积, $\text{km}^3$ ;  $T$ 为特定深度上的岩石温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$ 为研究区地表年平均温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

### 3.2 资源量估算结果

估算得出浏山地区2~6 km深干热岩资源量为 $33.50 \times 10^{17} \text{ kJ}$ ,折合1143.39亿吨标准煤。按2%利用率计算,浏山干热岩资源量为22.87亿吨标准煤。

## 4 结论与建议

(1)通过对研究区区域地质、大地热流特征、地温场特征、岩石热物理性及放射性生热率测试分析,表明研究区有较好的干热岩资源赋存地质条件和地质背景。

(2)用体积法计算浏山岩体2~6 km干热岩资源总量为 $33.50 \times 10^{17} \text{ kJ}$ ,折合1143.39亿吨标准煤。按2%利用率计算,浏山花岗岩体中可利用资源量为22.87亿吨标准煤。

(3)初步研究表明,湖南浏山区具备干热岩资源形成条件,且该岩体具有一定的资源潜力,建议在物探工作基础上施工1~2个试验孔,进一步加快、加强该区详细的资源调查研究工作。

[注 释]

- ① 刘振忠,李统桂. 1974. 湖南省宁乡县灰汤地热区灰汤段水文地质勘探报告[R].
- ② 李再荣. 2002. 湖南省宁乡县灰汤地下水资源评价报告[R].

## [References]

- Armstead C H, Tester J W. 1987. Heat mining: A new source of energy [M]. New York: E. & F. N. Spon; 462–471.
- Chang Lu. 1987. Drilling practice and complete technique of the Huitang geothermal hot water supply wells [J]. *Geology and Exploration*, (11): 69–70 (in Chinese with English abstract).
- Cui Zhengguo. 1983. Geology and uranium mineralization characteristics of the Weishan Mountain [J]. *Hunan Geology*, 2(2): 63–69 (in Chinese).
- Ding Xing, Sun Weidong, Wang Fangyue, Chen Linli, Li Qiuli, Chen Fukun. 2012. Single-grain mica Rb–Sr isochron ages and mineral chemistry for the Weishan pluton in Hunan Province and implications on petrogenesis and mineralization of Mesozoic composite granite in South China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(12): 3823–3840 (in Chinese with English abstract).
- Ding Xing, Chen Peirong, Chen Weifeng. 2005. Zircon LA–ICP MS U–Pb in the granite of Wei Mountain, Hunan; Enlightenment and significance of diagenesis [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 35(7): 606–616 (in Chinese).
- Geng Liping. 1998. Geographical distribution and exploration of geothermal resources in China [J]. *Geology and Exploration*, 34(1): 50–55 (in Chinese with English abstract).
- Huang Changqi, Lin Fengjie, Ye Bingfei. 2018. The characteristics of radioactive heat production rate and assessment of hot dry rock in high-value areas of heat flow, Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 37(3): 227–237 (in Chinese with English abstract).
- Hunan Institute of Geological Survey. 2017. Regional geology of China, Hunan [M]. Beijing: Geological Publishing House; 1001–1008 (in Chinese).
- Hunan Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. 1988. Regional geology of Hunan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House; 396–417 (in Chinese).
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4<sup>th</sup> edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892–2910 (in Chinese with English abstract).
- Kang Fangping, Liu Jianxin, Han Zhongyu, Deng Zhuan. 2017. Using the integrated electrical method to detect geothermal resources in Taipingwei of Qiyang County [J]. *Geology and Exploration*, 53(6): 1155–1163 (in Chinese with English abstract).
- Li Dewei, Wang Yanxin. 2015. Major issues of research and development of hot dry rock geothermal energy [J]. *Earth Science – Journal of China University of Geosciences*, 40(11): 1858–1869 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China [J]. *Geology in China*, 40(1): 312–321 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Fengyuan, Gan Haonan, Ma Feng, Wang Guiling. 2015. Site selection and development prospect of a hot dry rock resource project in Zhangzhou geothermal field, Fujian Province [J]. *Science & Technology Review*, 33(9): 28–34 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Gan Haonan, Wang Guiling, Ma Feng. 2016. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in southeastern of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 2043–2058 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. An estimation of HDR resources in China's Mainland [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(5): 807–811 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of northwest China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 196–206 (in Chinese with English abstract).
- Shuai Huan, Wu Jian, Yang Huihong, Chen Peixi. 2017. Depth calculation of underground hot water circulation of Ningxiang huitang geothermal field [J]. *Land & Resources Herald*, 14(3): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- Smith M C. 1973. Geothermal energy [J]. *Geothermal Engineering Ltd.*, London: 1–31.
- Tenzer H. 2001. Development of hot dry rock technology [J]. *GBC Bulletin*, 14–22.
- Wang Chunlin. 1999. On the reason of shallow terrestrial heat in Hunan [J]. *Journal of Xiangtan Normal University*, 20(6): 110–115 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Lin Wenjing, Liu Feng, Gan Haonan, Fu Lei. 2018. Project progress of survey, evaluation and exploration demonstration of national geothermal resource [J]. *Geological Survey of China*, 5(2): 1–7 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China [J]. *Science & Technology Review*, (32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 2015. Geothermics and its applications [M]. Beijing: Science Press; 83–91 (in Chinese).
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Feng Bo. 2018. Enhanced geothermal system; International progresses and research status of China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936–1947 (in Chinese with English abstract).
- Yang Lizhong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, Wang Andong, Wan Jianjun. 2017. On deployment of high temperature deep geothermal wells in typical areas with hot dry rock potential in China [J]. *Geology and Exploration*, 53(2): 355–360 (in Chinese with English abstract).
- Ye Weiping. 1986. General situation of comprehensive utilization of geothermal test station for Huitang [J]. *Popular Utilization of Electricity*, 1(4): 50–51 (in Chinese).
- Zhang Chao, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Jiang Guangzheng, Gao Peng, Wang Yibo, Hu Shengbiao. 2018. Geothermal characteristics of the Qiabuqia geothermal area in the Gonghe Basin, northeastern Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(11): 4545–4557 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jian-

- qiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087 – 1102 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1993. Research of heat production in SE China[D]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences; 1 – 24 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. Characteristics of heat production distribution in SE China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 292 – 305 (in Chinese with English abstract).
- [附中文参考文献]
- 常 璐. 1987. 宁乡灰汤地热供水管井的钻井及成井工艺[J]. *地质与勘探*, (11): 69 – 70.
- 崔正国. 1983. 浏山岩体地质及铀矿化特征[J]. *湖南地质*, 2(2): 63 – 69.
- 丁 兴, 陈培荣, 陈卫锋. 2005. 湖南浏山花岗岩中锆石 LA – ICPMSU – Pb 定年: 成岩启示和意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 35(7): 606 – 616.
- 丁 兴, 孙卫东, 汪方跃, 陈林丽, 李秋立, 陈福坤. 2012. 湖南浏山岩体多期云母的 Rb – Sr 同位素年龄和矿物化学组成及其成岩成矿指示意义[J]. *岩石学报*, 28(12): 3823 – 3840.
- 耿莉萍. 1998. 中国地热资源的地理分布与勘探[J]. *地质与勘探*, 34(1): 50 – 55.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社: 396 – 417.
- 湖南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·湖南志[M]. 北京: 地质出版社: 1001 – 1008.
- 黄昌旗, 林锋杰, 叶冰斐. 2018. 福建大地热流高值区岩体岩石放射性生热率特征及与干热岩有关的指标评价[J]. *福建地质*, 37(3): 227 – 237.
- 姜光政, 高 珊, 饶 松, 张林友, 唐晓音, 黄 方, 赵 平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集咏. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 59(8): 2892 – 2910.
- 康方平, 柳建新, 韩中骥, 邓 专. 2017. 综合电法在湖南祁阳太平圩地热资源勘查中的应用[J]. *地质与勘探*, 53(6): 1155 – 1163.
- 李德威, 王焰新. 2015. 干热岩热能研究与开发的若干重大问题[J]. *地球科学 – 中国地质大学学报*, 40(11): 1858 – 1869.
- 蔺文静, 甘浩南, 王贵玲, 马 峰. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及靶区选址研究[J]. *地质学报*, 90(8): 2043 – 2058.
- 蔺文静, 刘志明, 马 峰, 刘春雷, 王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 33(5): 807 – 811.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312 – 321.
- 蔺文静, 王凤元, 甘浩男, 马 峰, 王贵玲. 2015. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析[J]. *科技导报*, 33(9): 28 – 34.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征[J]. *地质科学*, 37(2): 196 – 206.
- 帅 焕, 吴 剑, 杨辉鸿, 陈培喜. 2017. 宁乡灰汤地热田干热岩资源埋藏深度探讨[J]. *国土资源导刊*, 14(3): 59 – 64.
- 汪集咏, 胡圣标, 庞忠和. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力估算[J]. *科技导报*, (32): 25 – 31.
- 汪集咏. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社: 83 – 91.
- 王春林. 1999. 试论湖南浅源地热之成因[J]. *湘潭师范学院学报*, 20(6): 110 – 115.
- 王贵玲, 张 薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4): 449 – 459.
- 王贵玲, 张 薇, 蔺文静, 刘 峰, 甘浩男, 付 雷. 2018. 全国地热资源调查评价与勘查示范工程进展[J]. *中国地质调查*, 5(2): 1 – 7.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 姜振蛟, 侯兆云, 李凤昱, 梁 旭, 冯 波. 2018. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. *地质学报*, 92(9): 1936 – 1947.
- 杨立中, 孙占学, 刘金辉, 王安东, 万建军. 2017. 中国典型干热岩潜力区的地热深井部署[J]. *地质与勘探*, 53(2): 355 – 360.
- 叶慰平. 1986. 灰汤地热试验电站综合利用概况[J]. *大众用电*, 1(4): 50 – 51.
- 张 超, 张盛生, 李胜涛, 贾小丰, 姜光政, 高 珊, 王一波, 胡圣标. 2018. 共和盆地恰卜恰地区现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 61(11): 4545 – 4557.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付 雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087 – 1102.
- 赵 平. 1993. 中国东南地区岩石生热率研究[D]. 北京: 中国科学院地质研究所: 1 – 24.
- 赵 平. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征[J]. *岩石学报*, 11(3): 292 – 305.

## Geological Characteristics and Resource Potential of Hot Dry Rock in the Weishan Pluton of Hunan Province

YE Jianling, ZENG Lin, YANG Hanyuan

(Oil and Gas Team of Hunan Coalfield Geology Bureau, Changsha, Hunan 410014)

**Abstract:** The purpose of this work is to clarify the geological characteristics and resource potential of the hot dry rock in the Weishan pluton of Hunan Province. By field geological investigations, rock and mineral tests and calculation of heat generation rates, we have studied the geologic and geothermal background of this pluton. The results show that there is a large – scale granite bedrock in this area, and the rock mass has high heat – generation rate, high radioactive heat, high thermal anomalies on the surface, indicating geological conditions for the presence of hot dry rock. On this basis, the volume method was used to estimate the hot dry rock resources of the 2 ~ 6 km rock mass in this area. The results show that the resources of the Weishan pluton of Hunan Province are  $33.50 \times 10^{17}$  kJ, equivalent to 114.339 billion tons of standard coal. It is considered that the Weishan area has good geologic conditions for hot dry rock and certain resource potential.

**Key words:** Weishan pluton, hot dry rock, geologic characteristics, resource potential, Hunan Province