www.cagsbulletin.com

基于多种估算方法的湖南省现今地温梯度综合确定

欧 健¹⁾,皮建高¹⁾,张保建^{2,3)*},唐显春^{2,3)},周 华¹⁾, 高 俊^{2,3)},白华青^{2,3)},王思琪^{2,3)},欧任文¹⁾,

黄郁淇1),皮景1),文娟1)

1)湖南省地质灾害调查监测所,湖南长沙 410004;
 2)中国地质科学院,北京 100037;
 3)自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心,河北石家庄 050061

摘 要: 湖南省目前地热井多为深度较小(多在 500 m 以浅)的热对流型,用地热井测温数据求取的地温梯 度一般偏大很多。为解决对流型地热测得的地温梯度偏大问题,本文采用地热温标、管道模型及基于生热 率的深部地温反推法等地温梯度估算方法,综合确定了湖南省现今的地温梯度。结果显示,湖南省高地温场 大致沿中部的白马山岩体、沩山岩体、幕阜山一黄龙山岩体一线和湖南省东南部分布,地温梯度大于 3.0 ℃/100 m; 5000 m 深度、6000 m 深度沩山岩体、热水圩一带的最高温度分别达到了 218.69 ℃、 216.70 ℃和 258.99 ℃、256.60 ℃。深大断裂与多块体接合部位的构造形态相配合,使湖南省中部构造交 汇带处于张开性的构造环境,有利于大气降水的深循环与深部热物质的上侵,是形成湖南省中部高地温场 的主要原因。湖南省东南部是西太平洋板块俯冲与回撤的前缘,处于江南造山带与华夏板块的接合带,有利 于大气降水的深循环与深部热物质的上侵;同时高放射性生热率的铀矿床、矿点也提供了较高的地壳热量, 是形成湖南省东南部高地温场的主要原因。地温梯度及地温场的科学界定,为湖南省下一步寻找高温地热 资源指明了方向。

关键词: 放射性生热; 地温梯度; 地温场; 湖南省 中图分类号: P314.3 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.022201

Comprehensive Determination of Present Geothermal Gradient in Hunan Province Based on Multiple Estimation Methods

OU Jian¹⁾, PI Jian-gao¹⁾, ZHANG Bao-jian^{2, 3)*}, TANG Xian-chun^{2, 3)}, ZHOU Hua¹⁾, GAO Jun^{2, 3)}, BAI Hua-qing^{2, 3)}, WANG Si-qi^{2, 3)}, OU Ren-wen¹⁾, HUANG Yu-qi¹⁾, PI Jing¹⁾, WEN Juan¹⁾

 Hunan Geological Disaster Investigation and Monitoring Institute, Changsha, Hunan 410004;
 Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;
 Technology Innovation Center of Geothermal and Hot Dry Rock Exploration and Development, Ministry of Natural Resources, Shijiazhuang, Hebei 050061

Abstract: At present, most geothermal wells in Hunan Province are thermal convection type with small depth (mostly shallow 500 m), and the geothermal gradient obtained from the temperature measurement data of geothermal Wells is generally much larger. In this paper, geothermal temperature scales, pipeline models, and deep geothermal temperature back-calculation methods based on the heat generation rate were used to estimate the geothermal gradient. The present geothermal gradients in Hunan Province were comprehensively determined. The high value geothermal field in Hunan Province is approximately located along the line of

第一作者简介: 欧健, 男, 1989 年生。工程师。主要从事地热地质相关勘查研究。E-mail: oujian06135@163.com。

本文由湖南省地质院科研基金项目(编号: HNGSTP202102)、国家自然科学基金项目(编号: 41902310)和中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20221677; DD20189114)联合资助。

收稿日期: 2022-10-26; 改回日期: 2023-02-18; 网络首发日期: 2023-02-26。责任编辑: 张改侠。

^{*}通讯作者:张保建,男,1972年生。博士,正高级工程师。从事地热、水文及环境地质相关研究。E-mail: zbjsddk@126.com。

Baishan granitoid pluton, Weishan granitoid pluton, Mufushan granitoid pluton, and Huanglongshan granitoid pluton. The geothermal gradient in the southeast of the Hunan Province is greater than 3.0 %/100 m. The highest temperature of the Weishan granitoid pluton and Reshuiwei area at 5000 m depth and 6000 m depth reached 218.69 %, 216.70 % and 258.99 %, 256.60 %, respectively. The combination of deep and large faults with the structural configuration of the joint part of multi-blocks makes the structural convergence zone in central Hunan Province in an open tectonic environment. This is conducive to the deep circulation of atmospheric precipitation and the intrusion of deep thermal material. This is the main reason for the formation of the high geothermal field in the central Hunan Province. The southeast of the Hunan Province is in front of the subduction and retraction of the West Pacific plate and is located in the junction zone between the Jiangnan orogenic belt and the Cathaysia plate, which is conducive to the deep circulation of atmospheric precipitation and the upwelling of deep thermal materials. Uranium deposits with a high radioactive heat generation rate also provide high crustal heat, which is the main reason for the formation of the high geothermal field in southeastern Hunan Province. The scientific definition of geothermal gradient and geothermal field in southeastern Hunan Province.

Key words: radioactive heat generation; geothermal gradient; geothermal field; Hunan Province

地温梯度又称地热梯度或地热增温率, 它特指 地球内部恒温带以下深度地温随深度的变化率,通 常用每 100 m 或 1 km 的温度增加值来表示。决定地 温梯度高低的基本因素是区域构造-热背景和地层岩 石的热导率; 地下水活动、构造界面两侧热物性差异 等也可以显著地影响浅部的地温梯度空间变化(汪集 暘, 2015)。地温梯度是地热资源评价的一个基础地热 参数, 在缺少钻孔测温资料的情况下, 可用来推算 热储温度, 评价地热资源量。地壳浅部地温场一般受 地下水活动影响显著,这种影响包括大气降水入渗 形成的浅部冷水(下降流)使地热水的补给区地温梯 度偏低,或是深循环形成的地热水在区域流体势的 作用下沿断裂、裂隙等破碎带、岩石脆弱带向上涌 出(上升流,即对流型地热区)使地热水排泄区地温 梯度偏高。在沉积盆地内部的传导性地热田, 地温梯 度受浅部冷水影响较小,一般可依据钻孔测温资料 直接计算求得地温梯度。在沉积盆地边缘、山地等 对流型地热区,一般需要较多的钻孔测温数据才能 确定地下水上升流、下降流影响的地区及其对地温 场的干扰程度,进而合理确定地温梯度。

在地热勘查研究时,一般是先根据钻孔测温数 据获取地温梯度,再根据地温梯度计算地热水循环 深度。但在地热孔深度小、或钻孔未揭露到热储或 是对流型地热的情况下,依靠钻孔测温数据很难求 得真实的地温梯度。湖南省目前地热点以温泉为主, 地热井较少,地热井深度普遍较小(多在 500 m 以 浅),地热井揭露的地热资源基本为热对流型(谭佳 良等,2015),在这种情况下用地热井测温数据求取 的地温梯度一般会偏大很多。为解决对流型地热测 得的地温梯度偏大问题,地热研究者多依据温泉或 热水孔的水化学资料,利用各类地热温标公式估算 热储温度,再以研究区内某些地热田可信度较高的

地热水循环深度作为研究区地热水循环深度的经验 值,求取研究区地温梯度。地热温标是确定深部热 储温度和地温梯度的一种简单实用的方法, 这方面 的计算案例有很多,常用的地热温标有二氧化硅地 热温标、Na-K温标、Na-K-Ca温标、Na-Mg温标等。 Fournier(1977)提出使用石英溶解度曲线计算深部 热储温度及二氧化硅含量。孙红丽等(2015)使用石 英温标、玉髓温标计算了西藏中部 12 个主要地热田 组成的高温地热带热储温度。卞跃跃和赵丹(2018) 利用二氧化硅温标和阳离子温标估算了康定地热田 雅拉河地下热水的热储温度为172~188 ℃,榆林河 地下热水的热储温度为 192~288 ℃。吴爱民等 (2018)选用 Na-K 温标和石英温标(无蒸汽损失)计算 了雄安新区容城地热田的热储温度分别为138 ℃、 116 ℃,略高于井口实测热水温度和井内实测温 度。Lin et al.(2022a)对比分析了水岩平衡分析、SiO2 地热温标、多矿物饱和指数、硅-焓混合模型等方法, 提出 SiO₂ 地热温标、多矿物饱和指数法在福建漳州 地区可取得较为可信的热储温度。

为了准确确定福建省漳州热田的温度场, 熊亮 萍等(1990)采用管道模型, 计算了漳州地热田的平 均地温梯度值为 3.0~3.5 ℃/100 m。帅焕等(2017) 采用管道模型计算了湖南省灰汤地热田的地温梯度 为 3.81~4.25 ℃/100 m。这两个地热田采用管道模 型法对地温梯度的计算结果与用其他地球物理方法 所得数值相一致(李大心和曾陆海, 1988), 证明管道 模型法在对流型地热田地温梯度的确定中有较好的 适用性。

此外,对于超过钻孔深度范围的温度不能通过直接测量取得,只能用间接的方法推算出来,依据大地 热流和生热率可以推算出上地壳不同深度的温度(邱 楠生等,2004),进而可反推出上地壳的地温梯度。 本文根据湖南省的地质构造条件及现有的地 热勘探数据,采用地热温标、管道模型及基于大地 热流、生热率的深部地温估算公式等地温梯度估算 方法,综合确定湖南省现今的地温梯度,以合理确 定深部热储的温度,为科学估算深部地热的资源量 提供依据。

1 研究区地质背景

湖南省地跨古生代扬子和华夏两个板块的交

界处,自元古界至新生界各时代地层发育齐全,大 部分层序完整、出露良好,沉积类型较多,有海相、 陆相、海陆交互相、冰川沉积相,横向变化明显。

湖南火山岩不发育,零星出露于雪峰山以东地 区,极少数分布在雪峰山西侧,规模较小,总出露面 积约 77 km²。根据火山岩赋存的地层时代及其相互 对比,其层位有冷家溪群、板溪群、震旦系、侏罗系、 白垩系和古近系。其中侏罗纪及其以后的火山岩主 要赋存在陆相碎屑岩中,显示陆相喷出的特点。



主要断层: F03一桃江—城步断层; F05一郴州—临武断层; F06一常德—安仁断层; F07—花垣—慈利断层。 主要岩体: 5—幕阜山岩体; 10—黄龙山岩体; 17—望湘岩体; 25—白马山岩体; 32—沩山岩体; 58—塔山岩体; 63—彭公庙岩体; 77—东岭岩体; 84—金鸡岭岩体。

Main faults: F03–Taojiang–Chengbu fault; F05–Chenzhou–Linwu fault; F06–Changde–Anren fault; F07–Huayuan–Cili fault. Main plutons: 5–Mufushan pluton; 10–Huanglongshan pluton; 17–Wangxiang pluton; 25–Baimashan pluton; 32–Weishan pluton; 58–Tashan pluton; 63–Penggongmiao pluton; 77–Dongling pluton; 84–Jinjiling pluton.

图 1 湖南省深部构造与岩浆岩的分布(修改自湖南省地质调查院, 2017)

Fig. 1 The distribution of deep structures and magmatic rocks in Hunan Province (modified from Hunan Institute of Geological Survey, 2017)

湖南南部中新生代玄武岩形成于大陆板内构造环境, 是地幔内部规模较小的不均匀的热扰动作用的产物, 而不是区域性地幔上隆和岩石圈伸展作用的产物, 即不是大陆裂谷环境的产物(朱勤文等, 1997)。

湖南省中酸性侵入岩比较发育,出露大于 0.1 km²岩体有 193 个,总面积 17 457 km²,占湖南 省侵入岩面积的 95%(龙西亭等, 2016),其他的侵入 岩体数虽多,但总面积小,侵入时代自中元古代至 中生代晚白垩世,岩性以花岗岩为主(图 1)。

湖南地处扬子板块与华夏板块两大地质单元的 接合部位,经历了武陵、雪峰、加里东、印支、燕山 和喜山等多阶段构造变动,构造复杂,岩浆活动频 繁。板块碰撞拼接缝合带属长期活动的深断裂带,是 地壳、上地幔的脆弱带,有利于壳幔热物质的向上运 移。著名的灰汤、热水圩温泉就位于缝合带部位。 湖南省处于西部印度板块与欧亚板块的陆-陆碰撞区 与东部太平洋板块与菲律宾板块向欧亚板块的俯 冲、回撤影响区之间。西部陆-陆碰撞、东部板块俯 冲对它影响都较小,一般没有火山活动和岩浆侵入, 没有大于 6 级以上的地震和高温温泉带,仅有差异 升降运动,是构造相对平静区(马力等,2004)。

大型断裂构造多以北东向、北西向为主, 如北

东向的花垣—慈利断裂带、桃江—城步断裂带、北 西向的常德—安仁断裂构造带等。新近纪以来仍在 活动的构造体系,主要类型有早—晚期新华夏系、 晚期新华夏系、华夏式构造体系等。它们的活动方 式、强度、频度及表现形式各有所不同,但以活动 断裂的形式为主,具有继承性、间歇性的特点。这 些活动的构造体系,基本上控制了省内的地震、温 泉分布。

据湖南地下热水资源调查统计,全省共发现地 下热水(≥25 ℃)点 220 余处。其中≥25 ℃的天然露 头 107 个,矿井 2 个,钻孔 110 多个(谭佳良等, 2015)。目前发现的地下热水以中低温为主,地热异 常区(带)的分布主要受构造控制,多数地热井或温 泉出水温度低于 60 ℃,但也有温度高于 90 ℃的 温泉两处,分别位于湖南省中东部的灰汤与东南部 的热水圩。湖南省目前尚无探明的干热岩资源。

灰汤地热田位于沩山岩体中部的河谷盆地,处 于北东向新宁一娄底一公田深大断裂带与北西向常 德一安仁深大断裂带交汇部位的南侧(图 2),天然 温泉温度 90 ℃左右,钻孔揭露温度井内最高温度 102 ℃(井深 616 m),钻孔自流水温 90~91 ℃,热 水赋存于脉带状构造裂隙含水带中。



图 2 沩山岩体区域地质图(叶见玲等, 2019)

Fig. 2 Geologic map of the Weishan pluton (YE et al., 2019)

热水圩地热田位于湘、赣、粤三省交界的诸广 山脉山间河谷盆地内,温泉在地表沿热水河床及岸 边处出露,泉域面积约 0.017 km²,天然流量 8.09 L/s,出露于燕山早期诸广山花岗岩体与震旦 系、寒武系地层接触带西的震旦系变质砂岩、板岩 地层中(图 3)。温泉水温一般为 88~91.5 ℃,曾测 到最高水温 98 ℃,地热井内(井深 200 m)水温 91.2~92.2 ℃,热水赋存于遂川一热水断裂控制的 带状热储内。





2 数据获取及研究方法

2.1 地热温标

二氧化硅地热温标是应用最早也是最常用的 地热温标,其理论依据是地热流体中二氧化硅的含 量主要取决于不同温度、压力下石英在水中的溶解 度。试验表明,水中二氧化硅的析出量与温度呈函 数关系(Fournier, 1977)。

由于用二氧化硅地热温标估算热储温度在湖 南省及周边取得了较好的估算效果(王莹等, 2007; 甘浩男等, 2020;杨支援和叶见玲, 2021),为全面掌 握湖南省地热资源热储温度及深部地热潜能,选取 湖南省近年来所采取的111处温泉或地热井的水化 学数据,运用二氧化硅地热温标法和玉髓温标估算 其热储温度。计算公式如下:

二氧化硅地热温标公式:

$$T = \frac{1309}{5.19 - \lg C} - 273.15 \tag{1}$$

玉髓温标公式:

$$T = \frac{1032}{4.69 - \lg C} - 273.15 \tag{2}$$

式中: T—热储温度,单位为摄氏度(\mathbb{C}); C—热水中溶解的 H₄SiO₄ 形式的 SiO₂ 含量,单位为毫克 每升(mg/L)。

2.2 管道模型

由于湖南省目前深度 2000 m 以上的地热井很 少,缺乏深部地温梯度的一手数据。因此,合理确 定深部地温梯度,是估算湖南省深部干热岩温度的 前提。在研究对流型热田时,可采用管道模型和断 层带模型以计算地下热水循环深度。由于灰汤地热 田与热水圩地热田更近似于管道模型,这里采用管 道模型计算。采用管道模型的方法,计算出热水循 环深度,进而推算出干热岩埋藏深度。

(1)管道模型及方法

管道模型是地热研究中用以描述深循环地热 系统中热量和质量传递过程的一种物理模型(图 9), 是 Donaldson 于 1968 年提出的(Rybach and Muffler, 1981),近年来在对流型地热研究中逐渐得到应用 (张森琦等, 2008;帅焕等, 2017)。它将热田中心视 为一个宽度为 2a、深度 H 的热水上涌管道(图 4)。 温度为 T₀的冷水从补给区进入系统后,在垂向下渗 及水平流动过程中不断被加热,至管道底部达到热 储温度 T_r,在管道内,温度为 T_r的热水在上涌途中 不断散热,温度呈线性降低,至地表处温度降至 T_s, 此时,在管道内有如下关系式:

$$\frac{T_{\rm s} - T_{\rm 0}}{T_{\rm r} - T_{\rm 0}} = \frac{2M'C}{\pi KH} \left[1 - \exp(\frac{-\pi KH}{2M'C}) \right]$$
(3)

式中, *H* 为地下水循环深度(m); *T*_s 为地表出露 泉水的温度或钻孔揭露热水上涌通道的温度(\mathbb{C}); *T*₀ 为地表多年平均气温(\mathbb{C}); *T*_r 为热储温度(\mathbb{C}); *C* 为岩石的比热(J/(kg· \mathbb{C})); *K* 为岩石热导率 (W/(m·K)); *M* '为热水在管道中上涌流率(L/s)。

由公式(3)看出,管道内热水上涌速度越快,能 量损失越小,在地表能见到的热水温度就越高。因 此,*M*'为决定热储地表温度的主要参数。

(2)管道区热水上涌流率的计算

灰汤、热水圩热田中心钻孔显示,模型管道中 心部位均为破碎花岗岩、花岗质构造角砾岩,渗透 性较好。热水在上涌过程中,热损失主要决定于钻 孔内地下水上涌的垂直流速。根据一维热传递方程 和边界条件,采用等间距的测量方法,则垂直流速 *V*_s为:

$$V_{\rm s} = \frac{K}{2Z\rho C} (1 - 2\frac{T_{\rm z} - T_{\rm 0}}{T_{\rm L} - T_{\rm 0}}) \tag{4}$$

式中, T₀为地表多年平均气温(℃); T_Z为计算井

段热储平均温度(℃); T_L 为井底实测温度(℃); K 为饱水岩石的热导率, ρ 、C 分别为水的密度和 比热, Z 为钻孔计算段长度。其中 K、 ρ 、C 的 取值分别为 K=2.721 W/(m·K), ρ =1.0×10³ kg/m³, C = 4.2×10³ J/(kg·℃)。

管道区地下热水上涌流率*M*'为管道区面积与 管道区钻孔中地下水的平均流速的乘积。





2.3 深部地温估算

目前湖南施工的钻孔深度一般小于 2000 m, 对 于超过钻孔深度范围的温度不能通过直接测量取得, 只能用间接的方法推算出来。在稳态热流状态下的 深部温度可用下式(邱楠生等, 2004)进行推算:

 $T(Z) = T_0 + q_0 \sum (Z_i / K_i) - \left[A_0 Z - (A_0 - A') Z^2 / (2Z') \right] \times 1/2 \sum (Z_i / K_i)$ (5)

式中: T_0 为地表温度(\mathbb{C}), q_0 为地表大热流值 (mW/m²), A_0 为地表生热率(μ W/m³), Z_i 和 K_i 分别为 各层段的厚度(m)和热导率(W/(m·K)), A´和 Z´分别 为底部生热率(μ W/m³)和计算点地层的总厚度(m)。

为了简单计算,常用下式进行计算:

 $T(Z) = T_0 + q_0 Z/K - AZ^2/2K$ (6)

式中: q_0 为上层地面的热流值,K为热导率 (W/(m·K)),Z为深度(m),A为生热率(μ W/m³)。

岩石热导率表示岩石导热能力的大小,即沿热 流传递的方向单位长度上温度降低 1 ℃时单位时 间内通过单位面积的热量。根据湖南省 25 眼钻孔



图 5 湖南省主要岩体生热率等值线图 Fig. 5 The thermal generation rate of main rock masses in Hunan Province

实测数据, 岩心热导率为 1.86~3.32 W/(m·K); 采用地下 水干扰较小测段的岩石热导率为 1.90~2.70 W/(m·K)。

岩石放射性生热率(A)是指单位体积岩石中所 含放射性元素在单位时间内由放射性衰变所产生的 能量,单位为 μW/m³。岩石生热率可由实测的岩石 中铀、钍、钾三种放射性元素含量计算获得:

 $A = 10^{-2} \times \rho \times (9.52 \times C_{\rm U} + 2.56 \times C_{\rm Th} + 3.48 \times C_{\rm K})$ (7)

其中, A 为岩石生热率(μW/m³), C_U、C_{Th}分别为 岩石中的U、Th含量(×10⁻⁶), C_K为K含量(%), ρ为 岩石密度(kg/m³)。岩体的U、Th、K含量数据来源 于《中国区域地质志·湖南志》(湖南省地质调查院, 2017),根据式(7)获得湖南省主要岩体的生热率数 据 84 组,根据绘制的湖南省生热率等值线图(图 5), 生热率较高的地段主要分布于湖南省东南部的郴州 市、株洲南部、衡阳东部、永州南部,怀化市南部 与邵阳市西部,岳阳市东部与长沙市东北部,生热 率一般为 6~10 μW/m³,其中姑婆山岩体、白马山 岩体等生热率在 12 μW/m³左右。

大地热流值采用湖南省地质矿产勘查开发局 四零二队 2016 年编制的《湖南省干热岩资源潜力研 究报告》中确定的 56 组热流数据(龙西亭等, 2016), 湖南省大地热流值一般在 40~90 mW/m²,其中湖南 省东南部、湖南省中部怀化至邵阳间的白马山岩体、 沩山岩体的东北部至湖南省的东北部边界大地热流 值较高,一般大于 70 mW/m²。

3 结果与讨论

3.1 管道模型估算的地温梯度

由于管道模型法需要有较多的钻孔测温数据 和产能测试数据才能用来估算,因此,湖南省目前 只有地热井较多的热水圩地热田和灰汤地热田适用 于管道模型方法。

3.1.1 热储温度的确定

热水圩地热田热储温度计算结果见表 1,用 SiO₂温标估算,热储温度值为132.1~144.1 ℃。灰 汤地热田热储温度计算结果见表 2, 用 SiO₂温标与 玉髓温标 2 组数据的交集,即热储温度值为 131.6~ 135.1 ℃。

根据热水圩地热田热储温度 $T_r = 132.1~$ 144.1 ℃,钻孔出水温度为 84.6~92.2 ℃,热水上 涌管道区地表温度取 $T_s = 88.4$ ℃, T_0 为16.6 ℃,根 据公式(6)可求出(T_s-T_0)/(T_r-T_0)= 0.622/0.563。根据 灰汤地热田热储温度 $T_r = 131.6~135.1$ ℃,钻孔出 水温度为92.5~101.3 ℃,热水上涌管道区地表温度 取 $T_s = 96.5$ ℃, T_0 为 16.8 ℃,根据公式(6)可求出 (T_s-T_0)/(T_r-T_0) = 0.694/0.674。

3.1.2 热水循环深度及地温梯度确定

根据实测数据, 热水圩、灰汤地热田的平均垂 直流速 V_s分别为1.422 0×10⁻⁶ cm/s、2.540 3×10⁻⁶ cm/s, 地热田面积分别为 0.153 2 km²、0.113 2 km²,利用 地热田面积与钻孔中地下水的平均垂直流速的乘积 求得热水圩、灰汤地热田地下热水上涌流率 M'分别 为 2.178 L/s、2.876 L/s。利用利用上述求出的 T_s、 T₀、T_r温度、(T_s-T₀)(T_r-T₀)值及 M'值作图,如图 6。

从图 6a 可求出热水圩地热田热水的循环深度 为 3.2 ~ 3.8 km;根据热水循环深度和热储温度,可 以计算出热水圩地热田区域性的平均地温梯度为 3.75 ~ 4.17 ℃/100 m。灰汤地热田热水的循环深度 为 2.7 ~ 3.1 km;根据热水循环深度和热储温度,可 以计算出灰汤地热田区域性的平均地温梯度为 3.81 ~ 4.25 ℃/100 m。

3.2 地热温标估算的地温梯度

为了避免地热水中混入的冷水过多,本文选用 温度较高、水-岩相互作用较充分、矿化度、SiO₂ 含量较高的地热水样进行SiO₂温标计算,由于目前 湖南省缺少深孔的测温资料,因此根据地热水循环 径流条件较好的用管道模型计算的热水圩、灰汤地 热田的循环深度,统一取湖南省地热水循环深度为 3000 m,根据SiO₂温标估算的热储温度,各温泉点 估算的地温梯度如表3。

Table 1	表 I 用 SIO ₂ 皿称片昇流小圩地流田流馆皿浸衣
Table 1	and chalcedony temperature scale

热泉及钻孔编	号 泉1	泉 2	ZK1	ZK4	ZK16	执健沮産/℃
SiO2浓度/(mg/)	L) 112	112	112.5	97.5	88	- 怒阻溫及/七
SiO₂温标/℃	143.8	143.8	144.1	135.9	132.1	132.1 ~ 144.1

表 2 用 SiO₂ 温标与玉髓温标计算灰汤地热田热储温度表

 Table 2
 Geothermal reservoir temperature of Huitang geothermal field calculated by SiO2

and chalcedony temperature scale									
热泉及钻孔编号	VI号	III号	IV号	Ⅲ号	Ⅲ号	III号	V号	WI号	执健沮産/℃
SiO ₂ 浓度/(mg/L)	100	120	110	90	120	119	130	126	- 新闻皿及气
SiO₂温标/℃	137.3	147.8	142.7	131.6	147.8	147.3	152.4	150.5	131.6 ~ 152.4
玉髓温标/℃	122.1	122.1	116.5	104.1	122.1	121.6	135.1	125.4	122.1 ~ 135.1



图 6 热水圩(a)与灰汤地热田(b)管道模型无量纲温度参数(T_s-T₀)/(T_r-T₀)与地下热水上涌流率 M'相关曲线 Fig. 6 Pipe model dimensionless temperature parameters and upwelling rate of underground hot water of Reshuiwei (a) and Huitang (b) geothermal fields

F-11. 2	表 3 湖南省用 SiO ₂ 温标估算的热储温度与地温梯度
rable 5	Geothermal reservoir temperature and geothermal gradient estimated by SiO ₂ temperature scale in
	Hunon Province

温泉位置	估算的热储 温度/℃	地温梯度 /(℃/100 m)	温泉位置	估算的热储 温度/℃	地温梯度 (℃/100 m)
郴州市安仁县龙海镇万田温泉	72.15	1.80	邵阳市绥宁县金屋塘镇温泉	90.23	2.41
张家界市慈利县零阳镇万福温泉	92.57	2.49	衡阳市衡东县杨桥镇金盆村温泉	44.00	2.30
张家界市慈利县零阳镇万福温泉	90.36	2.41	株洲市攸县柏市镇温泉	71.09	1.77
浏阳沿溪镇大光湖温泉	86.88	2.30	郴州市宜章县江水乡夏落村温泉	52.49	2.30
常德市石门县大河洲温泉	87.30	2.31	郴州市永兴县悦来温泉	82.53	2.15
湘西永顺县灵溪镇不二门温泉	75.57	1.92	郴州市宜章县栗源镇温泉	56.43	2.30
湘西永顺县灵溪镇不二门温泉	75.85	1.93	湘西永顺县润雅乡温泉	76.70	1.96
郴州市永兴县马田镇元家桥温泉	86.47	2.28	常德市石门县维新镇热水溪温泉	95.99	2.60
岳阳市岳阳县公田温泉	120.85	3.43	常德市桃源县热市温泉	83.70	2.19
衡阳市耒阳市东湖圩温泉	89.17	2.37	常德市桃源县热市温泉	86.35	2.28
张家界市桑植县陈河镇仪西温泉	81.78	2.13	邵阳市绥宁县唐家坊镇盐井村温泉	101.27	2.78
郴州市北区人民路街道办事处温泉	48.65	2.50	郴州市桂阳县仁义镇莲花坪温泉	32.00	2.50
邵阳市隆回县司门前温泉	97.96	2.67	邵阳市隆回县高洲温泉	123.10	3.50
郴州市宜章县用口温泉	74.08	1.87	邵阳市隆回县高洲温泉	122.96	3.50
郴州市宜章县用口温泉	84.70	2.22	邵阳市隆回县高平镇堂下桥温泉	110.28	3.08
邵阳市新邵县龙溪铺镇田心温泉	103.37	2.85	株洲市炎陵县平乐乡东北温泉	104.79	2.89
邵阳市新邵县龙溪铺镇田心温泉	100.32	2.74	郴州市宜章县麻田温泉	87.13	2.30
株洲市茶陵县八团乡白龙温泉	70.50	1.75	长沙市长沙县路口镇麻林桥温泉	109.36	3.05
邵阳市隆回县羊古坳乡禾木山温泉	96.22	2.61	邵阳市洞口县桐山乡黄湾温泉	90.35	2.41
张家界市慈利县江垭镇温泉	74.38	1.88	郴州市宜章县温泉水温泉	77.78	1.99
郴州市资兴市汤市温泉	116.41	3.28	郴州市宜章县温泉水温泉	93.03	2.50
郴州市资兴市汤市温泉	115.68	3.26	张家界市永定区温塘镇温泉	89.20	2.37
郴州市宜章县一六镇汤湖里温泉	78.39	2.01	郴州市临武县金江镇裕仙温泉	81.05	2.10
张家界市慈利县沙刀湾温泉	71.44	1.78	郴州市嘉禾县珠泉镇新麻地村温泉	65.50	1.60
湘西龙山县洗车河镇鸡屎塘温泉	82.13	2.14	郴州市宜章县关溪乡锡塘村温泉	54.64	1.60
株洲市茶陵县枣乡岩口村温泉	30.25	2.30	郴州市永兴县塘门口镇糠泉村温泉	105.58	2.92
郴州市安仁县军山乡郁水温泉	48.99	1.60			

3.3 深部地温反推的地温梯度

用式(6)推算的湖南省中酸性岩体 3000 m 深度 温度及反推的地温梯度见表4,湖南省中酸性岩体以 东南部地区地温梯度最高,多大于4.0 ℃/100 m;其 次为白马山岩体及其周边小岩体、湖南省东北部的 岩体,地温梯度在3.5 ℃/100 m左右;其他大部分岩 体地温梯度在 3.0 ℃/100 m 以下。

3.4 估算方法的比较及地温梯度的确定

3.4.1 三种地温梯度估算方法的比较

三种地温梯度估算方法中,管道模型法依据了 热水圩地热田和灰汤地热田较多的钻孔测温数据及 流速等产能测试数据,其精度最高,且有效降低了

	Table 4 Calcula	ted temperatur	e and geothern	mal gradient at 3	3000 m depth in H	lunan Province	
岩体编号	岩体名称	3000 m 深度 温度/℃	地温梯度 /(℃/100 m)	岩体编号	岩体名称	3000 m 深度 温度/℃	地温梯度 /(℃/100 m)
S 湘-00081	姑婆山岩体	169	5.24	S 湘-00052	五团岩体	102	2.92
S 湘-00082	禾洞岩体	146	4.44	S 湘-00006	岩坝桥岩体	102	2.92
S 湘-00073	骑田岭岩体	137	4.13	S 湘-00038	普迹岩体	102	2.92
S 湘-00077	东岭岩体	137	4.13	S 湘-00054	长溪水岩体	101	2.88
S 湘-00040	崇阳坪岩体	135	4.06	S 湘-00037	板杉铺岩体	101	2.88
S 湘-00080	白芒营岩体	133	3.99	S 湘-00079	铜山岭岩体	101	2.88
S 湘-00071	香花岭岩体	131	3.92	S 湘-00061	上堡岩体	101	2.88
S 湘-00075	瑶岗仙岩体	131	3.92	S 湘-00022	张坊岩体	100	2.85
S 湘-00026	天龙山岩体	131	3.92	S 湘-00036	均坝岩体	100	2.85
S 湘-00063	彭公庙岩体	130	3.89	S 湘-00034	花石岩体	100	2.85
S 湘-00074	千里山岩体	129	3.85	S 湘-00058	阳明山岩体	100	2.85
S 湘-00069	麦地岩体	127	3.78	S 湘-00023	龙王排岩体	99	2.81
S 湘-00084	金鸡岭岩体	127	3.78	S 湘-00059	大义山岩体	98	2.78
S 湘-00065	万洋山岩体	125	3.72	S 湘-00067	大庆坪岩体	98	2.78
S 湘-00085	大东山岩体	124	3.68	S 湘-00024	葛滕岭岩体	98	2.78
S 湘-00051	汉背岩体	122	3.61	S 湘-00046	鸡笼街岩体	98	2.78
S 湘-00049	川口岩体	122	3.61	S 湘-00053	兰蓉岩体	98	2.78
S 湘-00029	大新岩体	121	3.58	S 湘-00028	冷水江岩体	97	2.74
S 湘-00039	中华山岩体	121	3.58	S 湘-00068	都庞岭岩体	97	2.74
S 湘-00017	望湘岩体	120	3.54	S 湘-00060	拖壁塘岩体	96	2.71
S 湘-00041	瓦屋塘岩体	120	3.54	S 湘-00056	越城岭岩体	94	2.64
S 湘-00025	自马山岩体	117	3.44	S 湘-00078	园石山岩体	94	2.64
S 湘-00072	坪宝岩体	116	3.40	S 湘-00004	庙山岩体	93	2.60
S 湘-00015	河溪岩体	115	3.37	S 湘-00021	长三背岩体	93	2.60
S 湘-00002	临湘岩体	114	3.33	S 湘-00027	新化岩体	93	2.60
S 湘-00016	沧水铺岩体	114	3.33	S 湘-00057	羊角塘岩体	92	2.57
S 湘-00010	黄龙山岩体	114	3.33	S 湘-00033	紫云山岩体	92	2.57
S 湘-00048	白莲寺岩体	113	3.30	S 湘-00031	太芝庙岩体	92	2.57
S 湘-00005	幕阜山岩体	112	3.26	S 湘-00055	苗儿山岩体	92	2.57
S 湘-00062	五峰仙岩体	112	3.26	S 湘-00003	华阁镇岩体	92	2.57
S 湘-00007	白马寺岩体	108	3.13	S 湘-00064	东风岩体	90	2.50
S 湘-00008	长乐街岩体	108	3.13	S 湘-00032	沩山岩体	88	2.43
S 湘-00009	岑川岩体	108	3.13	S 湘-00001	桃花山岩体	88	2.43
S 湘-00066	寨前岩体	108	3.13	S 湘-00012	符竹溪岩体	88	2.43
S 湘-00014	桃江岩体	108	3.13	S 湘-00045	关帝庙岩体	87	2.40
S 湘-00076	苦竹坪岩体	107	3.09	S 湘-00042	牛头寨岩体	84	2.29
S 湘-00018	枨冲岩体	106	3.06	S 湘-00043	四明山岩体	83	2.26
S 湘-00019	蕉溪岭岩体	105	3.02	S 湘-00070	牛塘冲岩体	82	2.22
S 湘-00030	寸石镇岩体	105	3.02	S 湘-00050	漕泊岩体	81	2.19
S 湘-00020	连云山岩体	105	3.02	S 湘-00044	桥江冲岩体	79	2.12
S 湘-00035	丫江桥岩体	105	3.02	S 湘-00011	大神山岩体	74	1.94
S 湘-00047	南岳岩体	103	2.95	S 湘-00013	芙蓉岩体	68	1.74

表 4 推算的湖南省 3000 m 深度温度与地温梯度

地下水对流的影响,其估算结果可信度最高。用 SiO₂ 温标估算地温梯度,不可避免会受到浅部混入 冷水的影响,本文选用水-岩相互作用较充分的、 SiO₂ 含量较高的地热水样进行 SiO₂ 温标计算,水-岩相互作用较充分的地热水一般是反映了其所处的 地热地质条件和所经历的深部水文循环过程,比较 接近真实的、经过深循环的地热流体的特征,因此, 虽然可能一般估算的热储温度偏低,但与真实的热 储温度比较接近。用公式(6)推算的中酸性岩体深部 温度及反推的地温梯度,主要是依据了岩体的生热 率、热导率这些热物性参数,对地热流体所经历的 深部水文循环过程反映不足。

3.4.2 地温梯度的综合确定

基于上面三种地温梯度估算精度的比较,热水 圩地热田和灰汤地热田采用管道模型法计算的地温 梯度平均值,分别为 3.99 ℃/100 m和4.03 ℃/100 m。 其他地段的地温梯度用 SiO₂ 温标法和深部地温反 推法综合确定,其确定原则如下:

(1)因为 SiO₂ 温标法估算精度比深部地温反推法(生热率法)相对较高,因此采用权重分配法综合确定地温梯度,其中 SiO₂温标法按 66.67%、深部地温反推法(生热率法)按 33.33%计算。

(2)对 SiO₂ 偏低或缺乏数据的计算点,采用深 部地温反推法(生热率法)计算的地温梯度;缺少生 热率数据、且 SiO₂ 含量较高的计算点,采用 SiO₂ 温标法计算的地温梯度。

综合确定的地温梯度结果见表 5、图 7。综合确定的地温梯度以湖南省中部和东北部较高,其中中部大致沿白马山岩体、沩山岩体、幕阜山一黄龙山岩体一线大致呈北东向分布,地温梯度大于3.0 ℃/100 m; 其他地段地温梯度大都小于 3.0 ℃/100 m。根据湖南省近年来施工的两眼 2000 m 以上的地热井测温数据来看,黄岩井井深 2030 m,地温梯度 2.03 ℃/100 m (北京泰利新能源科技发展有限公司, 2021); 双牌井井深 2 018.88 m,地温梯度 2.69 ℃/100 m(湖南省城乡建设勘测院有限公司, 2022),与本次综合确定的地温梯度等值线图吻合较好(图 7)。

3.5 湖南省不同深度地温等值线及地温场特征初步分析

根据上述综合确定的湖南省地温梯度数据, 估算并绘制了湖南省1000 m、2000 m、3000 m、 4000 m、5000 m、6000 m 深度的地温分布状况与等 值线图(图 8a-f)。从图 8 中各子图看出,湖南省同深 度的温度较高地段主要位于湖南省东南部和湖南省 中部的白马山岩体—沩山岩体—黄龙山岩体—线及 周边;温度较低区主要位于湖南省西北部的宽缓褶

皱区和衡阳盆地一带。湖南省从 4000 m 深度左右 开始出现 150 ℃以上的高温地热资源(图 8d), 主要 呈星点状分布在沩山岩体、白马山岩体的北部、幕 阜山岩体的西侧以及湖南省东南部的热水圩等地, 沩山岩体、热水圩一带最高温度为 178.39 ℃、 176.80 ℃; 5000 m 深度开始出现 180 ℃以上的高 温地热资源(图 8e), 主要呈星点状分布在沩山岩 体、白马山岩体的北部、幕阜山岩体的西侧以及湖 南省东南部的热水圩等地, 沩山岩体、热水圩一带 最高温度为 218.69 ℃、216.70 ℃,在中部和东南 部两个高温带周边及高温带之间的区域基本都在 150 ℃以上, 怀化至常德一线的西北部地区则普遍 小于150 ℃;6000 m 深度湖南省中部和东南部两个 高温带基本都达到了200 ℃左右,两个高温带周边 及高温带之间的区域基本都在180 ℃左右, 沩山岩 体、热水圩一带最高温度为 258.99 ℃、256.60 ℃ (图 8f)。地温场特征表明,湖南省中部白马山岩体 一沩山岩体—黄龙山岩体—线及湖南省东南部是寻 找高温地热资源(包括干热岩)的有利地段。

湖南省中部的白马山岩体—沩山岩体—黄龙 山岩体一线,处于多块体接合部位,距扬子、华夏 板块的深部接合带较近,同时也位于洞庭地块与江 南造山带的交接部位,即位于由江南造山带到洞庭 地块的岩石圈厚度强烈变薄梯度带上,洞庭地块的 软流圈深度较浅,有利于软流圈热物质向其周边的 岩石圈上侵或在分流聚热作用下热量侧向向上传导 (史猛等, 2021)。北东向的公田一灰汤一新宁断裂带 从湖南省中部穿过,并在沩山岩体的北部与北西向 常德一安仁深大断裂交汇,与多块体接合部位的构 造形态相配合, 使沩山岩体处于一个张开性的构造 环境, 是现今深部热物质上涌的有利通道; 同时软 流圈热物质的上涌也可造成断裂的局部活化,有利 于大气降水的深循环与深部幔源、壳源热物质的上 侵(王贵玲和蔺文静, 2020)。这是形成湖南省中部高 地温场的主要原因。此外,湖南省中部较厚的沉积 地层,也为高温地热的形成提供了良好的保温盖层 (Lin et al., 2022b)_o

湖南省东南部是西太平洋板块俯冲与回撤的 前缘,处于江南造山带与华夏板块的接合带,由于 岩石圈伸展-减薄作用(陈昌昕等,2022),有利于深 部幔源热物质的向上传导和软流圈热物质上涌。郴 州—临武深大断裂带(包括其次级断裂带,如遂川 —热水断裂)在热水圩地热田东北部与北西向常德 —安仁深大断裂交汇,是切穿地壳甚至岩石圈的深 大断裂,属于张开性的构造部位,是现今深部热物 质上涌的有利通道;同时软流圈热物质的上涌

超星·期刊

第三期

表 5 湖南省综合确定的地温梯度							
Table 5 Com	对应岩体	热储温度	地温梯度(温标法)	地温梯度(生热率法)	地温梯度(综合确定)		
温泉位直	编号	/℃	/(°C/100 m)	/(°C/100 m)	/(°C/100 m)		
永州市祁阳县肖家村镇八庙温泉	S 湘-00058	52.53	_	2.85	2.85		
郴州市安仁县龙海镇万田温泉	S 湘-00062	72.15	1.80	3.26	2.29		
张家界市慈利县零阳镇万福温泉	1_5	92.57	2.49	-01	2.49		
永州市江永县千家峒温泉	S 湘-00079	65.19	N/_/	2.88	2.88		
浏阳沿溪镇大光湖温泉	S 湘-00023	86.88	2.30	2.81	2.47		
常德市石门县大河洲温泉	$> - \smallsetminus$	87.30	2.31	$\wedge \rightarrow \rangle$	2.31		
湘西永顺县灵溪镇不二门温泉	_	75.85	1.93		1.93		
郴州市永兴县马田镇元家桥温泉	S 湘-00072	86.47	2.28	3.40	2.65		
岳阳市岳阳县公田温泉	S 湘-00005	120.85	3.43	3.26	3.37		
衡阳市耒阳市东湖圩温泉	S 湘-00062	89.17	2.37	3.26	2.67		
张家界市桑植县陈河镇仪西温泉		81.78	2.13		2.13		
郴州市北区人民路街道办事处温泉	S 湘-00074	48.65	2.50	3.85	2.95		
邵阳市隆回具司门前温泉	S湘-00025	97.96	2.50	3 44	2.93		
郴州市官竟具用口温泉	S 湘-00073	84 70	2.07	4.13	2.92		
邵阳市新邵县龙溪铺镇田小温泉	S湘-00026	103 37	2.22	3.92	3 20		
林洲市荃陵县八团乡白龙温泉	S湘-00029	70.5	1.75	3.61	2 36		
邓阳市陈回县禾木山涅皋	S湘 00045	96.22	2.61	3.01	2.30		
北 家 史 古 兹 利 見 汀 证 结 涅 島	5 MH-00025	74.38	1.88	5.44	2.88		
版 新市 志 利 云 仁 望 侯 価 永	∽ 客湖 00065	116 /1	2.28	2 80	2.49		
柳川市贝六市初市温永	5 祖 00005	78.20	3.28	2.69	3.48		
和州市且草云—八镇初砌主温永 上汕市完全日本溪泪自	5 祖 00085	120.84	2.01	5.08	2.30		
大伊中丁夕 云灰 彻 血永 	5 府 -00028	139.84	—		4.05		
柳州市水云去使江镇观日间温永	5 府日-00061	69.81	_	2.88	2.88		
相四龙田安优千何镇冯床塘温永		82.13	2.14	-	2.14		
林川中东陵县で夕石口村温永	5 府-00051	30.25	2.30	3.61	2.73		
^郴 州巾女仁去半山乡即小温永 邓四支巡亡日 人 昌塘訪泪自	5 州 -00062	48.99	1.60	3.26	2.15		
印印印	S 湘-00040	90.23	2.41	4.06	2.95		
衡阳印衡乐县物桥镇金盆村温泉	S 湘-00048	44.00	2.30	3.30	2.63		
休洲印仪县相印镇温泉 期出去完美县运 14 在夏 莱 县语自	S 湘-00036	71.09	1.77	2.85	2.13		
郴州巾且草县江水乡复洛村温泉 [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1] [1]	S 湘-00073	52.49	2.30	4.13	2.90		
邢州巾永兴县悦米温泉	S 湘-00061	82.53	2.15	2.88	2.39		
郴州市宜草县栗源镇温泉	S 湘-00085	56.43	2.30	3.68	2.76		
湘西永顺县润雅乡温泉		76.70	1.96	—	1.96		
郴州市汝城县热水圩温泉	S 湘-00077	119.41	_	_	3.99		
常德市石门县维新镇热水溪温泉	—	95.99	2.60	—	2.6		
常德市桃源县热市温泉	—	86.35	2.28	—	2.28		
邵阳市绥宁县唐家坊镇盐井村温泉	S 湘-00041	101.27	2.78	3.54	3.03		
郴州市桂阳县仁义镇莲花坪温泉	S 湘-00072	32.00	2.50	3.40	2.80		
邵阳市隆回县高洲温泉	S 湘-00025	123.10	3.50	3.44	3.50		
邵阳市隆回县高平镇堂下桥温泉	S 湘-00025	110.28	3.08	3.44	3.20		
株洲市炎陵县平乐乡东北温泉	S 湘-00065	104.79	2.89	3.72	3.17		
郴州市宜章县麻田温泉	S 湘-00075	87.13	2.30	3.92	2.84		
长沙市长沙县路口镇麻林桥温泉	S 湘-00017	109.36	3.05	3.54	3.21		
邵阳市洞口县桐山乡黄湾温泉	S 湘-00025	90.35	2.41	3.44	2.75		
郴州市宜章县温泉水温泉	S 湘-00075	93.03	2.50	3.92	2.97		
张家界市永定区温塘镇温泉	—	89.20	2.37	_	2.37		
郴州市临武县金江镇裕仙温泉	S 湘-00071	81.05	2.10	3.92	2.70		
郴州市嘉禾县珠泉镇新麻地村温泉	S 湘-00071	65.50	1.60	3.92	2.37		
郴州市宜章县关溪乡锡塘村温泉	S 湘-00075	54.64	1.60	3.92	2.37		
郴州市永兴县塘门口镇糠泉村温泉	_	105.58	2.92	_	2.92		

注: 表中"—"表示缺少该项内容或数据。



图 7 湖南省综合确定的地温梯度等值线 Fig. 7 Comprehensively determined contour lines of the geothermal gradient in Hunan Province

也可造成断裂的局部活化,有利于大气降水的深循 环与深部幔源、壳源热物质的上侵。区域鹿井、城 口等铀矿床、矿点密布,为放射性生热率高值区, 如热水圩温泉附近的鹿井矿田地壳的放射性生热量 至少为 72.66 mW/m²,远高于全球平均地壳放射性 生热量 40 mW/m²(李建威等, 2000),遂川一热水断 裂等为放射性元素的迁移集聚提供了通道与富集空 间。

4 结论

(1)本文采用地热温标、管道模型及基于大地热 流、生热率的深部地温估算公式等地温梯度估算方 法,综合确定了湖南省现今的地温梯度,湖南省中 部大致沿白马山岩体、沩山岩体、幕阜山一黄龙山 岩体一线和湖南省东南部地温梯度大于 3.0 ℃/100m;其他地段地温梯度大都小于3.0 ℃/100m。 绘制了湖南省不同深度地温等值线图,为下部寻找 高温地热资源指明了方向。

(2)地温场特征表明,湖南省中部白马山岩体— 沩山岩体—黄龙山岩体—线及湖南省东南部是寻找 高温地热资源(包括干热岩)的有利地段。湖南省从 4000 m 深度左右开始出现 150 ℃以上的高温地热 资源;5000 m 深度开始出现 180 ℃以上的高温地热 资源, 沩山岩体、热水圩一带最高温度为 218.69 ℃、216.70 ℃;6000 m 深度在湖南省中部和 东南部两个高温带温度达到了 200 ℃左右,沩山 第三期



a-1000 m; b-2000 m; c-3000 m; d-4000 m; e-5000 m; f-6000 m. 图 8 湖南省不同深度地温分布与地温等值线 Fig. 8 The distribution and contour of ground temperature at different depths in Hunan Province

岩体、热水圩一带最高温度为 258.99 ℃、256.60 ℃。
(3)湖南省中部距扬子、华夏板块的深部接合带较近,同时也位于洞庭地块与江南造山带的交接部位,深大断裂与多块体接合部位的构造形态相配合,使湖南省中部构造交汇带处于张开性的构造环境,是现今深部热物质上涌的有利通道;同时软流圈热物质的上涌也可造成断裂的局部活化,有利于大气降水的深循环与深部幔源、壳源热物质的上侵。这是形成湖南省中部板块缝合带附近高地温场的主要原因。

(4)湖南省东南部是西太平洋板块俯冲与回撤 的前缘,处于江南造山带与华夏板块的接合带附近, 有利于深部幔源热物质的向上传导和软流圈热物质 上涌。深大断裂带及其交汇部位,是现今深部热物 质上涌的有利通道,有利于大气降水的深循环与深 部幔源、壳源热物质的上侵。区域高放射性生热率 的铀矿床、矿点也提供了较高的地壳热量。

在此需要申明的是,依据本文确定的地温梯度 推算的深部高温范围只是反映了一种高温的可能趋 势,是说明在预测的高温范围内有可能找到高温地 热资源,并不是说所有圈定的高温范围的浅部都一 定能找到高温地热,只有在成热地质要素较好的构 造部位才有可能在相对较浅的深度探测到高温地 热。

致谢:感谢审稿专家对本文的审阅及提出的宝贵修 改建议。

Acknowledgements:

This study was supported by Geological Bureau of Hunan Province (No. HNGSTP202102), National Natural Science Foundation of China (No. 41902310), and China Geological Survey (Nos. DD20221677 and DD20189114).

参考文献:

- 卞跃跃,赵丹. 2018. 四川康定地热田地下热水成因研究[J]. 地 球学报, 39(4): 491-497.
- 北京泰利新能源科技发展有限公司. 2021. 湖南省怀化市黄岩 地热井钻井工程竣工报告[R]. 北京:北京泰利新能源科技 发展有限公司.
- 陈昌昕,吕庆田,陈凌,史大年,严加永,艾印双.2022. 华南陆 块地壳厚度与物质组成:基于天然地震接收函数研究[J]. 中国科学:地球科学,52(4):760-776.
- 耿瑞瑞. 2021. 鹿井铀矿床深部和外围三维成矿预测研究[D]. 北京:核工业北京地质研究院.
- 甘浩男, 蔺文静, 闫晓雪, 岳高凡, 张薇, 王贵玲. 2020. 粤中隐 伏岩体区地热赋存特征及热异常成因分析[J]. 地质学报, 94(7): 2096-2106.
- 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.

- 湖南省城乡建设勘测院有限公司.2022.湖南省永州市双牌县 河东开发区地热水勘查地热井完井报告[R].长沙:湖南省 城乡建设勘测院有限公司.
- 李大心,曾陆海. 1988. 漳州热田地温场分布规律研究及其成因 模式的初步设想[J]. 地球科学, 13(3): 229-239.
- 李建威,李紫金,傅昭仁,李先福. 2000. 遂川-热水走滑断裂带 热异常与热液铀成矿作用[J]. 地质科技情报,19(3): 39-43.
- 龙西亭,周华,殷秉武. 2016. 湖南省干热岩资源潜力研究 报告[R]. 长沙: 湖南省地质矿产勘查开发局四零二队.
- 马力, 陈焕疆, 甘克文, 徐克定, 许效松, 吴根耀, 葉舟, 梁 兴, 吴少华, 邱蕴玉, 章平澜, 葛芃芃. 2004. 中国南方 大地构造和海相油气地质(上)[M]. 北京: 地质出版社.
- 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 2004. 沉积盆地热体制研究的理论与 应用[M]. 北京: 石油工业出版社.
- 孙红丽,马峰, 蔺文静, 刘昭, 王贵玲, 男达瓦. 2015. 西藏高温 地热田地球化学特征及地热温标应用[J]. 地质科技情报, 34(3): 171-177.
- 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.
- 史猛,康凤新,张杰,高松,于晓静. 2021. 胶东半岛不同构造 单元深部热流分流聚热模式探讨[J]. 地质学报,95(5): 1594-1605.
- 谭佳良,赵祈溶,宋厚园. 2015. 湖南省地热志[R]. 长沙: 湖南 省地质调查院.
- 汪集暘. 2015. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴爱民, 马峰, 王贵玲, 刘金侠, 胡秋韵, 苗青壮. 2018. 雄安新 区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J]. 地球学 报, 39(5): 523-532.
- 王莹,周训,于湲,柳春晖,周海燕. 2007. 应用地热温标估算 地下热储温度[J].现代地质,21(4):605-612.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020. 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, 94(7): 1923-1937.
- 熊亮萍, 汪集旸, 庞忠和. 1990. 漳州热田地下热水的循环深 度[J]. 地质科学, (4): 377-384.
- 叶见玲,曾琳,杨汉元. 2019. 湖南沩山岩体干热岩地质特征及资源潜力[J]. 地质与勘探, 55(5): 1287-1293.
- 杨支援, 叶见玲. 2021. 湖南汝城干热岩赋存条件及资源类型 分析[J]. 湘潭大学学报(自然科学版), 43(6): 107-116.
- 朱勤文, 王方正, 路凤香, 钟增球. 1997. 湘南中新生代玄武岩 成因研究及构造环境分析[J]. 地球科学, 22(6): 584-588.
- 张森琦,李长辉,孙王勇,许伟林,辛元红,石维栋,王占昌, 范永贵. 2008. 西宁盆地热储构造概念模型的建立[J]. 地质 通报, 27(1): 126-136.

References:

- BIAN Yue-yue, ZHAO Dan. 2018. Genesis of geothermal waters in the Kangding Geothermal Field, Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(4): 491-497(in Chinese with English abstract).
- Beijing Taili New Energy Technology Development Co., Ltd. 2021. Completion report of Huangyan geothermal well drilling project in Huaihua City, Hunan Province[R]. Beijing: Beijing Taili New Energy Technology Development Co., Ltd(in Chinese).
- CHEN Chang-xin, LÜ Qing-tian, CHEN Ling, SHI Da-nian, YAN Jia-yong, AI Yin-shuang. 2022. Crustal thickness and composition in the South China Block: Constraints from earthquake

receiver function[J]. Science China Earth Sciences, 52(4): 760-776(in Chinese with English abstract).

- FOURNIER R O. 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems[J]. Geothermics, 5(1-4): 41-50.
- GENG Rui-rui. 2021. Study on 3D metallogenic prediction of Lujing uranium deposit in deep and peripheral areas[D]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology(in Chinese with English abstract).
- GAN Hao-nan, LIN Wen-jing, YAN Xiao-xue, YUE Gao-fan, ZHANG Wei, WANG Gui-ling. 2020. Analysis of geothermal occurrence characteristics and origin of the thermal anomalies in the hidden igneous rock area in the central Guangdong[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2096-2106(in Chinese with English abstract).
- HUNANN INSTITUTE OF GEOLOGICAL SURVEY. 2017. Regional geology of China · Hunan Annals[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- HUNAN URBAN AND RURAL CONSTRUCTION SURVEY INSTITUTE CO., LTD. 2022. Completion report of geothermal well for geothermal water exploration in Hedong Development Zone, Shuangpai County, Yongzhou City, Hunan Province[R]. Changsha: Hunan Urban and Rural Construction Survey Institute Co., Ltd(in Chinese).
- LI Da-xin, ZENG Lu-hai. 1988. The study of geothermal distribution in Zhangzhou geothermal area and a preliminary model of its geothermal formation[J]. Earth Science, 13(3): 229-239(in Chinese with English abstract).
- LONG Xi-ting, ZHOU Hua, YIN Bing-wu. 2016. A study report on the potential of dry hot rock resources in hunan province[R]. Changsha: Team 402, Hunan Provincial Bureau of Geological and Mineral Exploration and Development(in Chinese).
- LIN Wen-jing, YIN Xiao-xiao. 2022a. Temperature estimation of a deep geothermal reservoir based on multiple methods: A case study in southeastern China[J]. Water, 14(20): 3205.
- LIN Wen-jing, WANG Gui-ling, GAN Hao-nan, ZHANG Sheng-sheng, ZHAO Zhen, YUE Gao-fan, LONG Xi-ting. 2022b. Heat source model for Enhanced Geothermal Systems (EGS) under different geological conditions in China[J]. Gondwana Research, https://www.sciencedirect.com/science/ article/pii/S1342937X22002416(in press).
- LI Jian-wei, LI Zi-jin, FU Zhao-ren, LI Xian-fu. 2000. Heat sources and hydrothermal uranlum mineralization in the Suichuan-Reshui strike-slip fault zone[J]. Geological Science and Technology Information, 19(3): 39-43(in Chinese with English abstract).
- MA Li, CHEN Huan-jiang, GAN Ke-wen, XU Ke-ding, XU Xiao-song, WU Gen-yao, YE Zhou, LIANG Xing, WU Shao-hua, QIU Yun-yu, ZHANG Ping-lan, GE Peng-peng. 2004. Geotectonics and petroleum geology of marine sedimentary rocks in South China (Book 1)[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- QIU Nan-sheng, HU Sheng-biao, HE Li-juan. 2004. Theory and application of geothermal regime in sedimentary basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press(in Chinese).
- RYBACH L, MUFFLER L J P. 1981. Geothermal systems: Princi-

ples and case histories[M]. Chichester: Wiley.

- SUN Hong-li, MA Feng, LIN Wen-jing, LIU Zhao, WANG Gui-ling, NAN Dawa. 2015. Geochemical characteristics and geothermometer application in high temperature geothermal field in Tibet[J]. Geological Science and Technology Information, 34(3): 171-177(in Chinese with English abstract).
- SHUAI Huan, WU Jian, YANG Hui-hong, CHEN Pei-xi. 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).
- SHI Meng, KANG Feng-xin, ZHANG Jie, GAO Song, YU Xiao-jing. 2021. Discussion on the deep heat flow diversion-acculturation between uplift and depression in different tectonic units in the Jiaodong Peninsula[J]. Acta Geologica Sinica, 95(5): 1594-1605(in Chinese with English abstract).
- TAN Jia-liang, ZHAO Qi-rong, SONG Hou-yuan. 2015. Geothermal records of Hunan Province[R]. Changsha: Hunan Geological Survey Institute(in Chinese).
- WANG Ji-yang. 2015. Geothermics and its applications[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- WANG Ying, ZHOU Xun, YU Yuan, LIU Chun-hui, ZHOU Hai-yan. 2007. Application of geothermometers to calculation of temperature of geothermal reservoirs[J]. Geoscience, 21(4): 605-612(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LIN Wen-jing. 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 1923-1937(in Chinese with English abstract).
- WU Ai-min, MA Feng, WANG Gui-ling, LIU Jin-xia, HU Qiu-yun, MIAO Qing-zhuang. 2018. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiongan New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 523-532(in Chinese with English abstract).
- XIONG Liang-ping, WANG Ji-yang, PANG Zhong-he. 1990. Circulation depth of the thermal water in Zhangzhou geothermal field[J]. Scientia Geologica Sinica, (4): 377-384(in Chinese with English abstract).
- YE Jian-ling, ZENG Lin, YANG Han-Yuan. 2019. Geological characteristics and resource potential of hot dry rock in the Weishan pluton of Hunan Province[J]. Geology and Exploration, 55(5): 1287-1293(in Chinese with English abstract).
- YANG Zhi-yuan, YE Jian-ling. 2021. Analysis on occurrence conditions and resource types of hot dry rock in Rucheng, Hunan Province[J]. Journal of Xiangtan University(Natural Science Edition), 43(6): 107-116(in Chinese with English abstract).
- ZHU Qin-wen, WANG Fang-zheng, LU Feng-xiang, ZHONG Zeng-qiu. 1997. Petrogenesis research and tectonic environment analysis about Mesozoic-Cenozoic basalts from southern Hunan[J]. Earth Science, 22(6): 584-588(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Sen-qi, LI Chang-hui, SUN Wang-yong, XU Wei-lin, XIN Yuan-hong, SHI Wei-dong, WANG Zhan-chang, FAN Yong-gui. 2008. Construction of the conceptual model of thermal reservoir structure of the Xining basin, China[J]. Geological Bulletin of China, 27(1): 126-136(in Chinese with English abstract).