我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究

蔺文静,甘浩男,王贵玲,马峰 中国地质科学院水文地质环境地质研究所,石家庄,050000

内容提要:干热岩资源是未来重要的清洁型能源,干热岩资源靶区选址是进行干热岩资源开发利用最基础的工作。本文在综合国内外相关干热岩开发项目的基础上,系统总结了干热岩选址的地热地质学指标,并对我国东南沿海地区的干热岩赋存背景进行论述,选取了广东阳江新州、广东惠州黄沙洞、雷琼断陷盆地、海南陵水等几个地区作为我国东南沿海干热岩开发的重点潜力靶区,在综合分析各靶区深部地热地质背景、深部热异常的基础上,建立了研究区深部温度场模型,进行了干热岩资源靶区选址对比研究,对下一步优先勘查靶区及勘查方案提出了建议。

关键词:干热岩;酸性岩体;靶区选址;指标体系;东南沿海

自从 20 世纪 70 年代初美国科学家提出干热岩概念以来,经过 40 余年的科学研究和生产实践,干热岩的概念得到了不断的修正和发展(Brown DW, 1995;Baria R et al.,1999)。迄今为止,世界上先后有多个国家开展了干热岩钻探试验(Olasoloa P et al.,2016),由于干热岩具有传统化石能源不可比拟的优势,越来越多的国家将干热岩的勘探开发列入了国家能源发展计划。

从地下高温岩体中提取热能的实验研究最早始 于七十年代美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的科学家 们,随后,英国,法国,日本等国家也相继展开了 EGS的研究工作。1972年以来,进行过试验的国外 干热岩项目有:美国新墨西哥州 Fenton Hill 项目 (Grigsby A et al., 1989; Brown D W et al., 1999), 德 国 巴 伐 利 亚 Falkenberg 项 目 (Kappelmeyer O et al., 1987), 英国康沃尔 Rosemanowes 项目(Parker R, 1999),法国莱茵地 堑内 Soultz 项目(Genter A et al., 1996), 法国 Le Mayet de Montagne 项目(Cornet F H,1987),瑞典 Fjallbacka 项目(Wallroth T et al., 1999),日本 Hijiori 项目和 Ogachi 项目 (Tenma N et al., 2008),澳大利亚 Cooper 盆地项目(Hunt S P et al.,2015)等,其中取得较好效果的是美国,英国,日 本以及法国。

到目前为止,中国干热岩资源开发及其技术研 究尚属起步阶段,许多能源专家和地质工作者认识 到此领域的重要性并为此做出了努力。Lin Wenjing et al. (2012)、Wang Jiyang et al. (2012)对 我国陆区的干热岩资源潜力进行了估算。Zeng Meixiang et al. (2007)研究发现天津地区处于高热 流构造带附近,沧县隆起上白塘口西断裂东侧大芦 北口一带和团泊东南地层深处埋藏着范围较大的基 性火成岩体,预计钻探至深部中元古界长城系地表 以下 3000~4000 m 的岩体温度可达 110~150℃; 据初步研究,江苏省苏北盆地 4000~5000m 深度, 地温达到 150℃,局部达到 170℃(Xu Xueqiu, 2008); Li Fu et al. (2010) 在海南陵水地区进行了深 层干热岩地热发电项目的勘查选址,结合全岛地热 条件对全国首个干热岩实验电站的下一步工作提出 了建议; Yan Weide(2015)在青海共和盆地探获了 干热岩体,2200m 深度花岗岩体温度达到 150℃以 上。2010年,国土资源部启动了公益性科研项目 "我国干热岩勘查关键技术研究",主要开展干热岩 高温钻探技术方面的研究,包括钻探工艺、器具及设 备配套研究和孔底连通技术预研究。2012年,吉林 大学、清华大学、中国科学院广州能源研究所承担了 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目"干热岩 热能开发与综合利用关键技术研究",开启了我国专

注:本文为中国地质调查局地质调查项目(编号:12120115045901,12120114025101)资助的成果。

收稿日期:2016-05-10;改回日期:2016-06-20;责任编辑:黄敏。

作者简介: 商文静, 男, 1978 年生。博士, 副研究员。主要从事地热资源调查评价相关研究; 通讯地址: 050061, 中国地质科学院水文地质环境地质研究所地热研究室; Email: lwenjing@msn. com。

门针对干热岩工程的研究。2013年,中国地质科学院水文地质环境地质研究所承担的地质调查项目"全国干热岩资源潜力评价与示范靶区研究",国内干热岩资源调查评价与开发研究进入实质性阶段(Lin Wenjing et al.,2015)。

东南沿海地区是我国最主要的花岗岩分布区 (Wang Dezi, et al., 2003),花岗岩中由于富含 U、 Th、K 等放射性元素,其放射性元素衰变形成了地 下的重要热源,在壳源产热和幔源产热均理想的情 况下花岗岩分布区的大地热流值可超过 100μW/ m²,因此,在覆盖层理想的地方,可以获取理想的干 热岩资源。同时,东南沿海地区还是我国主要的近 代火山活动分布区,本区位于板块边缘,构造活动发 育, 具有多期大规模的幕式岩浆活动(Zhao Hailing, et al., 1999; Zhao Hailing, et al., 2004)。地下岩浆沿断裂带喷发出地表而形成火山, 而未喷发部分残存于深部以局部岩浆囊的形式存 在,在其周围则易形成干热岩。本文在综合国内外 相关干热岩开发项目的基础上,系统总结了干热岩 选址的地热地质学指标,并对我国东南沿海地区的 干热岩赋存背景进行论述,选取了广东阳江新州、雷 琼断陷盆地、海南陵水以及广东惠州黄花洞等几个 地区作为我国东南沿海干热岩开发的重点潜力靶 区,在综合分析各靶区深部地热地质背景、深部热异 常的基础上,建立了研究区深部温度场模型,进行了 干热岩资源靶区选址对比研究,对下一步优先勘查 靶区及勘查方案提出了建议。

1 干热岩赋存的地热地质学指标

理论上,干热岩是地球上一种无处不在的资源,只要掘井足够深就能达到满足发电要求的地热温度(理论上认为最少要达到 150 °C,但在实践过程考虑到投资和商业化生产等因素一般要求干热岩体温度超过 200 °C)。然而,由于钻探技术和经济成本等其它因素的制约,在目前的条件下,必须要寻找埋藏深度较浅、温度相对较高、有潜在经济价值的干热岩体进行勘探开发。因此,在进行干热岩开发之前,必须要建立起一套评价干热岩体的地质学指标。

1.1 合适的干热岩体(基底)

选择适合的干热岩体是进行干热岩能量开发的 前提和基础,它至少要满足以下两个条件。

首先,干热岩体应具有相对高的放射性生热元素。地热能作为一种来自地球内部的能量,它的最

终能量主要来源于丰度相对较高的长半衰期放射性元素(主要是 Th, U 和 K)的衰变和地球形成时由于重力垮塌而产生的能量。因此,放射性生热元素 Th, U 和 K 含量的高低直接决定了干热岩体的温度。一般采用单位体积生热率来评价干热岩体的生热能力(Qiu Nansheng,2002)。尽管理论上处在一定地壳深度的变质岩(如片麻岩等)和岩浆岩(如花岗岩、闪长岩等)都可视作干热岩体,但是目前开发的干热岩体大部分为温度较高的花岗岩体(Zhao Ping,1995),并具有壳源成因,这可能是因为壳源成因的花岗岩在熔融形成过程中具有富集不相容元素(包括 Th, U 和 K)的能力。

第二,花岗岩体的规模要相对较大,规模太小的 花岗岩体不适合用于干热岩能量开发,一方面是因 为岩体太小增加技术难度,另一方面岩体太小导致 干热岩电站寿命周期太短而难以实现商业化生产, 增大投资风险。但是较小的岩体可以用来作为干热 岩的早期探索研究。

1.2 低导热率盖层

仅仅有干热岩体还远远不够,为了保存好基底能量,防止大气降水渗入冷却岩体,需要在基底之上覆盖有低导热率的盖层,这种盖层通常主要是沉积岩(沉积物)或火山岩,有时候也可以是合适厚度的风化壳层。Rybach L et al. (1978)等人形象地把盖层比作毛毯,将其作用称为毛毯效应(blanket effect)。综合各种因素,一般认为地堑(断陷)盆地最适合于干热岩能量开发,事实上目前进行的干热岩项目绝大部分都选址于盆地中。如欧洲设在法国的干热岩项目就选址于 Rhine 地堑盆地中,而澳大利亚的第一个干热岩项目选址于 Cooper 盆地中。

1.3 高的地热异常

理论研究和生产实践均表明,适合干热岩开发的区域均为热异常区域。可以借助以下地球物理参数来判别一个区域的热异常情况。

地温线:地温线又叫温度一深度函数,主要用来描述温度随深度的变化情况。热异常区域表现为随深度增加,温度递增显著。

地温梯度:以每 100m 垂直深度上增加的温度数来表示,有时也以每 km 垂直深度上增加的温度数来表示。地温梯度越大,热异常越明显。

热流量:一般用英文字母q表示,是岩石导热率 (k)和地温梯度(dT/dZ)的乘积,标准单位为 mW/m^2 ,常用单位为HFU。通常认为热流量显著高于 $63\sim105~mW/m^2$ 区域才有干热岩开发价值,如美国

和日本的干热岩选址在局部地表热流量高于 80mW/m²的区域。

1.4 合适的应力条件

干热岩项目选址区的应力场条件也是需要考虑的重要因素之一。Chopra P et al. (2003)等认为选址区的沉积物盖层和花岗岩基底需要有高的构造应力存在,从而保证它们具有低的流体渗透性、低的热流传导,使对流引起的热损失最小化。挤压构造背景下的应力场格局通常是一种比较理想的条件。

1.5 地体稳定区域/地震不活动区域

增强型地热系统发展相对缓慢的另一个因素是政府和民众担心由于干热岩的开发而引发人工地震。由于干热岩的开发都选址于地热异常区,而地热异常区一般都位于构造活动带(如板块边缘、裂谷带,等),而这些区域通常都是地震的孕育区,干热岩项目带来的潜在地震活动是必须要考虑的重要问题之一。

表 1 适合干热岩开发的地热地质学标准
Table 1 Geothermal geological index for HDR

基底岩石类型	以壳源型高产热花岗岩为主			
单位体积生热率	\geqslant 5. $0\mu W/m^3$			
岩体规模	\geqslant 100 km ²			
岩体构造应力状态	高构造应力			
岩体形成时代	以显生宙为主			
干热岩体地温梯度	一般大于 30℃/km			
盖层地温梯度	越高越好,局部(火山口)达 100℃/km			
盖层盆地类型	断陷盆地最佳			
地表热流值	显著高于 70mW/m²			
构造区域	地震不活跃的高热流地区			

2 东南沿海地区干热岩资源赋存条件

我国东南沿海地区中生代时期发生大规模花岗质岩体侵位,面积之大,范围之广,是世界范围内罕见的。根据学者研究发现,东南沿海地区中生代时期花岗岩类侵位事件具有明显的时空分布规律(Li Jianhua et al., 2014; Gao Wanli et al., 2014; Deng Jinfu et al., 2016)。按照地质年代划分,中生代最早期三叠纪花岗岩类岩浆活动主要出现在远离欧亚一太平洋板块接触带的内陆地区,侏罗纪花岗岩类岩浆活动则相对于三叠纪更靠近板块接触带,而白垩纪花岗岩类岩浆活动则分布在我国东南海岸一带,相对最为靠近板块接触带。整体而言,东南沿海地区的花岗岩类岩浆活动具有由西向东,岩体侵位时代由老变新的整体趋势(图1)。由于花岗岩类岩石具有高放射性生热率,为地壳生热提供直接热

来源,因此,中生代广泛出现的花岗岩类岩浆活动,为干热岩资源的形成提供了重要条件。

大地热流值是干热岩资源赋存分布的重要地热地质指标之一。我国东南沿海地区大地热流值整体受大地构造背景影响明显(Hu Shengbiao et al.,1994)(图 2):西北侧的盆地区整体构造活动较稳定,表现为较低的大地热流值,而靠近板块接触带的东南海岸一带,则表现为较高的大地热流值。在整体由西向东热流值逐渐升高的趋势下,局部的深部热结构控制了大地热流值的高低。从图 2 中可以看出福建福州、漳州以及广东阳江一茂名一带大地热流值达到最高,热流值达到 95µW/m²以上。

放射性生热是岩石圈内热的主要来源之一,U,Th 和天然放射性同位素 40K 是主要的生热元素。根据 Zhao Ping et al. (1995)的研究,东南沿海地区绝大部分区域都处于高生热率范围,基本都高于2. 1μ W/m³。尤其是广东全省及江西南部、福建南部地区的大面积花岗岩出露,生热率背景超过了2. 8μ W/m³,如此大面积的高生热率区域在全球大陆实属罕见。放射性生热作为地壳生热最主要的热来源,对干热岩资源的赋存有重要意义。东南沿海地区,尤其是广东惠州、丛化一带,具有良好的干热岩资源勘查开发前景。

根据我国东南沿海地区 5.5km 深度地温反演结果(图 3),其与大地热流值分布图、居里面埋深图及壳幔埋深剖面图基本一致,这同时也说明了东南沿海地区的深部温度整体受大地构造背景的控制作用影响。从图 3 中可以看出,福建福州、漳州、广东阳江及湖南汝城地区具有较高的深部温度,局部可达 250℃以上。

在综合考虑干热岩资源赋存的地热地质条件与 地方需求,圈定出广东阳江新洲、雷琼断陷盆地、广 东惠州黄沙洞以及海南陵水等地区作为东南沿海干 热岩资源勘查可选靶区。

3 靶区选址对比研究

3.1 阳江新洲地热田

新洲地热田位于阳东县新洲北西 4km,其水热 异常赋存于燕山期花岗岩裂隙中,并以热泉、热地、 硅华的形式显示于地表,分布于一长形洼地中,并 大体上呈线状排列,连续分布长约 650 m,宽 20~ 10m。共出露 8 个热泉,其中有三个在西、北、东外 围。泉水最高温度 97℃,热水溢出的同时,偶有气 泡逸出。2013 年,依托中国地质调查局项目,在区

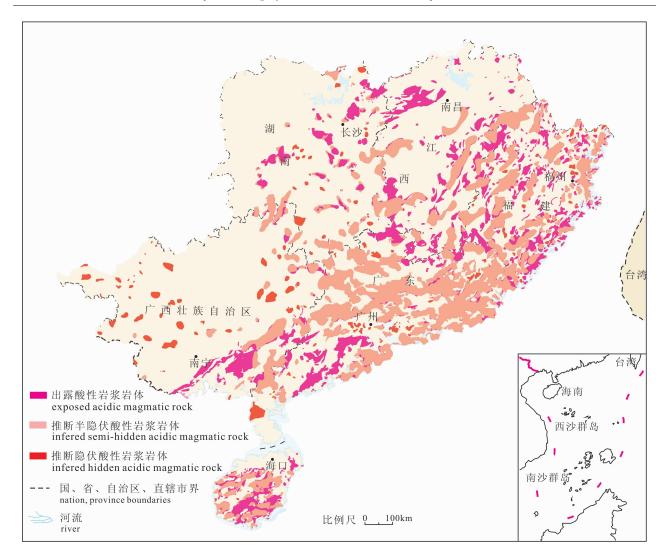


图 1 我国东南沿海酸性岩体分布图

Fig. 1 Distribution of acid intrusive bodies in Southeastern of China

内施工千米钻(深 1002.3m)—眼,孔底温度达 107 $^{\circ}$ (图 4)。

新洲地热田位于广东省中西部沿海,在大地构造上位于华南褶皱系(I级)粤中拗陷(II级)阳春一开平凹褶断束(IV级)西南段,按照板块构造观点,研究区位于粤中地块西南部,在区域性展布构造格局中,区域构造位置处于恩平一新丰深断裂带西南段。区内褶皱构造主要表现为片理、片麻理弯曲变形,在区域上属于阳江东西向构造带的组成部分,两者走向主要为北西向和近东西向,局部发育层间向形和背形,露头尺度上多见小揉皱和褶曲。

3.1.1 基底分布

(1)酸性岩浆岩体分布及规模

新洲地热田内存在的侵入岩体为燕山期侵入的新洲岩体,以酸性、中酸性岩为主。根据相关研究测年结果,新洲岩体年龄为120~140Ma,在地表出露

面积约为 300 km²,但是在海洋中所出露的面积尚不得知,根据区域重力资料估算得知,新洲岩体地表的分布面积约为 600 km²。

(2)酸性岩浆岩体放射性生热率

新洲地热田热储岩性为燕山期中粗粒黑云母花岗岩、中粒斑状黑云母花岗岩,据相关资料,平均单位体积生热率可达 5.75 μ W/m³。

3.1.2 盖层分布情况

热田上覆盖层为第四系淤泥、泥炭土、亚粘土,厚 0.20m~>11.84m,从总的趋势而言,从东到西第四系厚度由厚变薄,西部基岩直接裸露地表,盖层不够理想。

3.1.3 热异常分析

(1)地温梯度

根据收集和实测资料数据,新洲地热田附近的 地温梯度为 4.2°C/100m,相对于全省偏高。

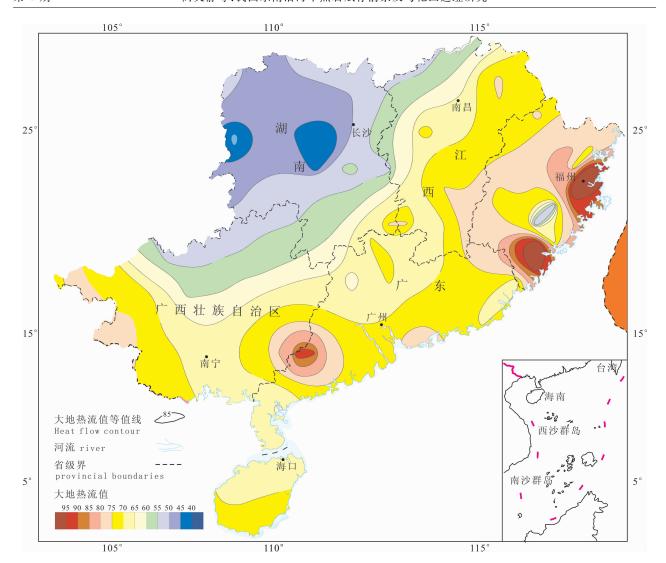


图 2 我国东南沿海地区大地热流值等值线图 Fig. 2 Heat flow map of Southeastern China

2013年7月开始,在新洲地热田原 ZK1号孔南侧 5m 处实施 1000m 地热钻探工程,至 2013年 12月 2日顺利竣工,钻进深度 1002.3m。钻孔 0~31.95m 为第四系松散物,31.95~737m 以中粗粒斑状黑云母二长花岗岩为主,部分段发育破碎中粗粒斑状黑云母二长花岗岩(破碎带)、绿泥石化中粒黑云母花岗岩,绢云母化斑状黑云母二长岩,绿泥石化黄铁矿化斑状黑云母二长花岗岩,737~1002m以中细粒黑云母花岗岩为主,并含有花岗质破碎带。根据钻孔温度实测资料,区内地温梯度为 3.875~4.500℃/100m。

千米地热钻在钻进过程中进行过多次测温,2013年12月7日~8日对地热钻进行第一次全孔测温,测温时流量 $4.459L/s(385m^3/d)$,实测最高温度 $107^{\circ}(1.6100) \sim 1002.3m$ 处),孔口温度仅 $1000 \sim 10000$ 和

 $795\sim835m$ 出现突变,其中 $697.5\sim725m$ 段偏离常规斜率 $1.4\sim2.9$ °、平均 2.2°C; $795\sim835m$ 段偏离 $-0.4\sim-3.8$ °、平均 -2.2°。

(2)大地热流特征

根据收集和实测资料数据,新洲研究区大地热流值处于 70~80Mw/m²区域内。相对于全省,属于中等水平。

研究区前期勘查布置了6口地温测量钻孔,测温及大地热流估算结果见表2。

根据 Hu Shengbiao et al. (2001) 有关数据统计,我国大陆东南地区大地热流值平均为 70 ± 19mW/m²,对比表 2 结果,位于研究区范围的 RL1 及 RL2 测点位置测得的大地热流值分别为 100.6 mW/m²和 122.4 mW/m²,高于正常平均值,反映了该部位可能属于高热流值的地热异常区;或除了正常的大地热流量外,还具有别的热源补充。

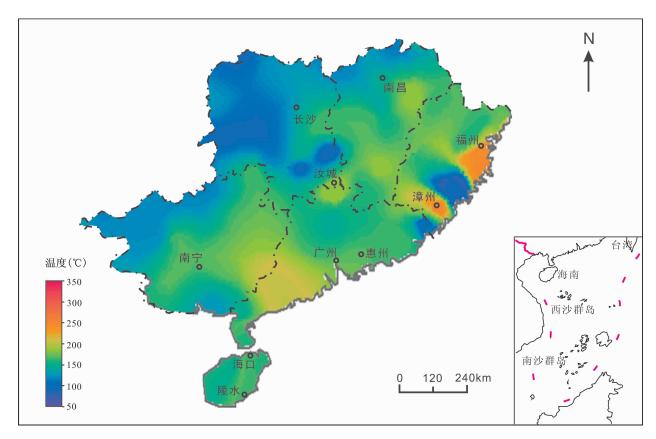


图 3 我国东南沿海地区 5.5km 深度地温分布图

Fig. 3 Temperature distribution of 5.5km depth inSoutheastern of China

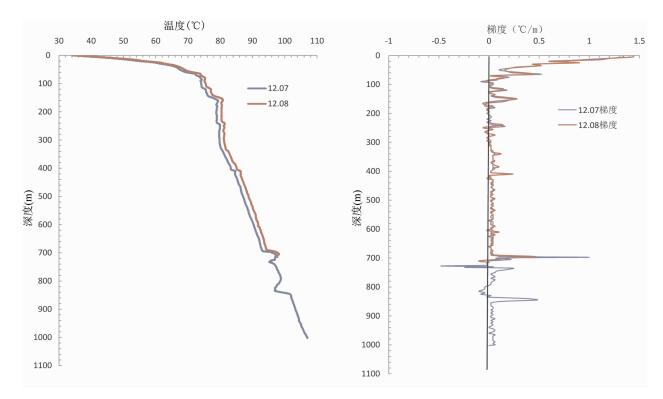


图 4 新洲地热田千米钻实测温度剖面(左)和梯度剖面(右)

Fig. 4 Temperature logging and geothermal gradient in borehole of Xinzhou geothermal field

表 2 新洲地热田地温测量与大地热流值

Table 2 Geothermal gradient and heat flow in Xinzhou geothermal field

测点编号	RL1	RL2	RL3	RL4	RL5	RL6
地温梯度 (℃/100m)	3.875	4.500	2.000	2.000	1.625	2. 625
岩石热导率 (W/(m・℃))	2.596	2. 721	2. 721	2. 721	2.596	2. 721
大地热流值 (mW/m²)	100.6	122. 4	54.4	54.4	42. 2	71. 426

注:岩石热导率数据参考《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2010)。

3.1.4 区域稳定性分析

研究区处于广东阳江位于欧亚板块和太平洋板块之间,属地震老震区。历史最强地震发生在 1969年,在阳江县西南洋边,震级为 6.4级,震源深度为 5km,震中烈度为侧度强。近几年,阳江地震日趋频繁,地震强度不大,约四年有一次 4级左右地震。但从近年地震监测情况看,阳江地区的地震强度、频度衰减比较快。经历史地震,近期前兆异常和序列余震分析,认为近期内发生更大地震的可能性很小。

3.1.5 深部热源分析及温度模拟

据区内开展的 MT 数据分析,区内深部存在大面积低阻带(图 5),软流圈层有底侵和隆起现象,岩石圈层由于岩浆的底侵而变薄,深断裂发育且控制着部分岩浆的侵入和分布,深部的热源可以通过深大断裂向上传导,并在地表形成具有一定热量的地热田。

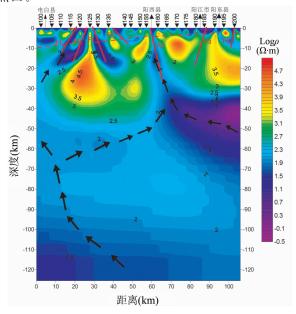


图 5 新洲地热田 MT 测线解释成果图 Fig. 5 Interpreted profile of MT measurement along the Xinzhou geothermalfield

利用新洲研究区内前期地热勘查资料,建立新洲地热田三维地温模拟和二维地温模拟(图 6)。图中显示,地表以下 4km 深部地温约为 435°K,相当于161℃。如果考虑新洲岩体余热的加温作用,则研究区 4km 深部岩体温度应超过 161℃,至于余热存在与否及其贡献大小有待进一步探测和研究。

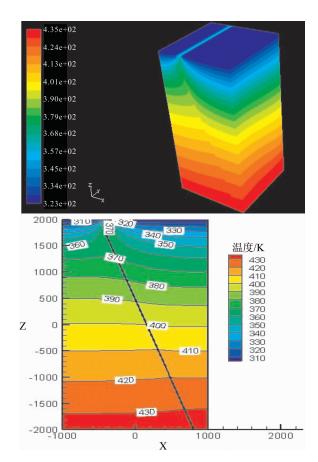


图 6 阳江新洲三维温度分布及地温剖面图 Fig. 6 3-D and 2-D temperature distribution in Xinzhou geothermal field

3.2 雷琼断陷盆地

雷琼斯陷盆地位于我国大陆的南端雷州半岛以及隔琼州海峡相望的海南岛定安大断裂以北的琼北地区,统称为雷琼盆地。该盆地实际上为南海北部大陆架之上的北部湾盆地的陆上部分。在地质构造上,该盆地为在不同性质的古生界基底和燕山期花岗岩之上发育起来一个以新生界为主的拉张型断陷盆地。根据构造发育特征和下第三系的分布,在雷州半岛整个盆地可划分出北部隆起、中部拗陷和南部隆起一翁田隆起三个构造单元。北部隆起位于盆地的北部,基底呈自北而南倾没的单斜,岩面略有起伏,新生界和上白垩统最大总厚度达2000~3000m。据重磁测量和钻探揭露,纪家、客路、南

兴、雷高和南三等地,有隐伏的花岗岩体(燕山期);南部隆起一翁田隆起位于盆地的南部、定安大断裂之北。雷州半岛南端的龙塘凸起划入此构造区。该凸起仅有第四系和上第三系,总厚约1000m,基底为下古生界;中部拗陷位于上两隆起之间,南北边界均以断裂为界。拗陷区内断裂发育,受 NE、NW及近 EW 三组断裂的控制和分割,形成许多规模不一的次级构造一凸起和凹陷。

3.2.1 基底分布

(1)酸性岩浆岩体分布及规模

本区侵入岩地表出露的主要位于北部廉江市、吴川市一带,分布较广,出露面积 1238.645km²,其余埋藏地下。据钻孔揭露,隐伏侵入岩成片见于雷州半岛东北角的坡头、塘基至南三一带,埋深 18.78~1200m,其他地区则零星分布,如据重磁测量和钻探揭露,纪家、客路、南兴、雷高等地,有隐伏的花岗岩体(燕山期)。

(2)酸性岩浆岩体放射性生热率

据相关研究(Zhao Ping,1995), 雷州半岛北部 出露的花岗岩体岩石放射性生热率介于 $2.8 \sim 4.9 \mu \text{W/m}^3$ 之间。

3.2.2 盖层分布情况

雷州半岛第四系、第三系沉积非常深厚,基底凸凹相间,呈高低相间带状展布,地热受基底凸凹相间构造格局控制,新生界盖层地温梯度随基岩面的起伏而变化。基岩埋深分别约为 1000~m 及 2000m 的企水凸起和流沙凸起盖层地温梯度分别为 $5.84\pm1.82~C/100m$ 和 $4.66\pm0.53~C/100m$;而基岩埋深分别为 $4000\sim5000m$ 、 $2000\sim2500~m$ 和 $2000\sim3000m$ 的迈陈凹陷、乌石凹陷和纪家凹陷,盖层地温梯度分别为 3.65 ± 0.22 、3.64 及 3.60~C/100m。

3.2.3 热异常分析

(1)地温梯度

雷州半岛地区地温梯度集中在 3.5~5.5℃/100m 之间,并在企水港地区得到 7.73℃/100m 的极高地温梯度(Chen Moxiang et al.,1991)。

(2)大地热流特征

雷州半岛 4 个代表地点的大地热流值见表 3。可以看出,湛江凹陷 3 口钻井的热流值十分接近,迈陈凹陷 2 井三个计算段的热流值也基本上一致。这说明热流测试结果可信,对凹陷区具有较大的代表性。

表 3 雷琼地区代表性大地热流数据表

Table 3 Typical heat flow data in Leizhou peninsula area

构造区 孔号	71 🖳	地理坐标		孔深(m)	取值深度	地温梯度	热导率	热流值	平均值
	东经	北纬	(m)		(°C/100m)	(W/m°C)	(mW/m^2)	(mW/m^2)	
	R9	110°16′	21°09′	800	$447 \sim 526$	3.54	1.92	68.1	
	观 18	110°21′	21°16′	240	70~140	3.58	1.72	61.5	62.6 \pm 5.0
	观 31			300	70~220	3. 35	1.74	58.3	
迈陈凹陷 迈参 2 井				20~199	3.59	1.79	64.3		
	迈参2井	迈参 2 井 109°58′ 2	20°25′	3227	199~530	4.36	1.78	77.6	71.3 \pm 6.3
				530~1050	3.89	1.85	71.9		

由此可见,雷州半岛大地热流值为 62.6 mW/m^2 ~ 71.3 mW/m^2 ,与大陆平均热流值 61 ± 15.5 mW/m^2 比较明显偏高,大大高于东南大陆热流平均值 59 mW/m^2 。

3.2.4 区域稳定性分析

雷州半岛处于东南沿海地震区雷琼地震带上,低震级的地震活动较频繁。湛江市地震局资料记载该市境内自 1356 年有地震记录以来,共发生有感地震 78 次,其中历史(1356~1970 年)有感地震 64 次(震级 M>4.5 级 14 次、最大为 5.75 级),现代(1971~1999 年)有感地震 14 次(有关记录详见表16)。北部湾、琼州海峡等邻区发生的强震对本区亦有影响,但其对本区造成的破坏烈度不超过 6 度。《中国地震动参数区划图》(GB18306~2001)将雷州

半岛的地震基本烈度定为 $VI \sim VII$ 度区,地震活动不活跃。

3.2.5 深部热源分析及温度预测

雷琼地区作为华南沿海新生代火山岩分布面积最大的区域,可辨认的火山口达 177 座。前人在此地区布置了 4 条 MT 测线,用以较好的揭示该地区的构造背景,通过对四条测线进行反演解释,得出雷琼地区存在一东西略宽,南北略扁的低阻体(Hu Changjiu et al.,2007)。

雷琼地区钻孔深度最大的为位于湛江市徐闻县的石油勘探井,深度 3203.18m。该井成井后进行了全孔测温,测温最大深度 3150m 部位测到井温 146.4 $^{\circ}$ (图 7),按该井全井段平均地温梯度 3.71 $^{\circ}$ (7)00m 推算,4000m 井温达 180 $^{\circ}$ 。另外,在

琼北海口市以西的澄迈福山凹陷布设有深部石油钻孔,井深 3200m,井底温度达 147℃。据相关资料 (Zeng Siyun et al.,2010),福山油田深井井深一般为 3400~4200 m,钻遇地层主要是下第三系的涠洲组和流沙港组,由于未收集到具体钻孔地层资料,因此无法判断是否钻至花岗岩层。

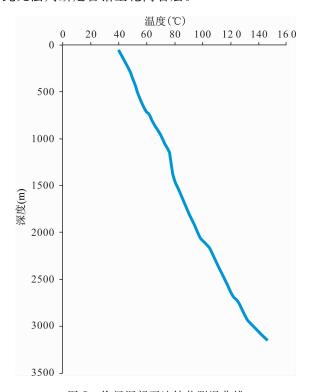


图 7 徐闻深部石油钻井测温曲线

Fig. 7 Temperature logging in Xuwen oil drilling

3.3 广东惠州黄沙洞地热田

黄沙洞地热田位于惠州市惠城区矮陂镇黄沙洞管理区沸塘村,是一处天然出露的温泉群,泉水水温为 $56\sim63.7$ \mathbb{C} 、流量为 0.38 \mathbb{L}/s 。 1994 年在该处进行钻探,成井 5 \mathbb{D} \mathbb{D}

黄沙洞地热田在区域上属华南准地台,东南沿海断褶带,处于河源深断裂带的南东侧约 30km,紫金一博罗深断裂带的南东侧约 12km,莲花山深断裂带北西侧约 40km。其中,紫金一博罗深断裂控制了区内燕山期花岗岩体的分布,复又切割了它们。该断裂发育强烈时期为燕山晚期,现在仍有活动。

地热田大地构造位置位于紫金一博罗断裂带北西侧,断裂带的南段的组成断裂潼湖断裂、川龙凹断裂在地热田南东 1.5~2.5km 处经过,属于测区内一级断裂。温泉出露于北东向潼湖大断裂带中北北西向隐伏花岗闪长岩岩株外接触带的交汇部位。

3.3.1 基底分布

(1)酸性岩浆岩体分布及规模

岩浆岩主要分布于研究区的北西侧,呈岩株状产出,面积约 28.83km²,呈突变式与围岩(测水组)接触,铷锶法同位素年龄测定结果为 192.3 ± 9.2Ma,岩石为细中粒黑云二长花岗岩。侵入体主要位于寒武纪一震旦纪砂页岩之中,呈椭圆形,与围岩呈侵入接触,界线规则清楚,其定位机制的可能模式是:在区内断裂联合作用下,侵入体所在部位形成一个高度破碎的拉张空间,深部岩浆以轻气球形式侵位形成现在的侵入体。

(2)酸性岩浆岩体放射性生热率

据相关研究(Zhao Ping,1995),区内出露大面积花岗岩体,岩石放射性生热率大于4.9µW/m³。

3.3.2 盖层分布情况

地热田中奧陶系地层以泥质粉砂岩和泥质或炭质页岩为主,岩石风化强烈,风化产物以透水性差的粘性土为主,风化带厚度较大,多数厚度在 30m 左右,局部达 30m 以上(ZK3 为 32 m、CK26 为50.10 m),岩石风化带和基岩(泥质粉砂岩和泥质或炭质页岩)的透水性均较差,可视作弱含水或隔水层,为地热田的良好盖层。

3.3.3 热异常分析

(1)地温梯度

据钻孔资料,研究区地热增温率要高于广东省的正常值,广东省多数地区的地热增温率约 $2.5 \, \mathbb{C}/100 \, \mathrm{m}$,研 究 区 的 地 热 增 温 率 推 测 可 达 $3.5 \sim 4.0 \, \mathbb{C}/100 \, \mathrm{m}$ 。

研究区内曾经施工多个热水井,其中深度最大、 孔内温度最高的钻井是 2013 年 10 月完成的 ZK8 井,深度 591.5m,根据测温结果显示,全孔地温从上 而下逐渐升温,其中 0~320m 段的深度一水温曲线 为斜率较小,增温率较大,达 22.2℃/100m,期间出 现几处曲线斜率的波动,显示中浅部导水裂隙中部 地温水的混合。320~540m 曲线斜率变大,且较稳 定,显示增温率变小,为 5.2℃/100m,水热获得较 弱;540m 以深段曲线有上翘之势,增温梯度加大, 达 10.4℃/100m,有随深度增加而升温幅度扩大的 趋势(图 8),表明在孔深之下仍有温度更高的水热 活动。

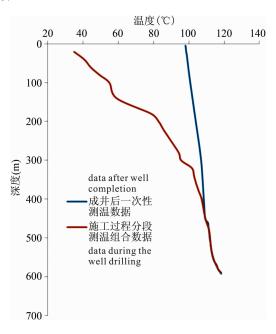


图 8 惠州 ZK8 钻孔测温曲线 Fig. 8 Temperature logging in ZK8, Huizhou

- 18. 0 - 11...p - 11...p - 11...p - 11...p

(2)大地热流特征

本区未开展大地热流背景值的专项研究工作,可参照中科院在深圳地区开展大地热流测试结果(表 4),大地热流高于 73 mW/m²。

表 4 邻近地区深圳市大地热流数据

Table 4 Heat flow data in Shenzhen City

编号	经纬度	深度(m)	增温梯度 (℃/km)	热导率 (W/(m•℃))	大地热流值 (mW/m²)
1	113°56′ 22°37′30″	50~140	21.3 ± 6.9	3.46±0.1	73. 7
2	114°07′ 22°33′	40~1998	25.3 ± 7.4	3.32±0.3	83. 9
3	114°07′ 22°33′	40~210	22.8 ± 6.6	3.58±0.17	81.6

3.3.4 区域稳定性分析

研究区周围的河源深断裂、莲花山深断裂和紫金一博罗大断裂均为活动断裂,也是广东省内主要的发震断裂之一,表现为频繁的低震级地震活动,尤其以河源断裂新丰江水库附近最为频繁。总体上研究区内及其附近的地震活动较弱,距离该区最近的紫金一博罗大断裂的活动性及近期地震活动概况如下:

紫金一博罗大断裂在研究区西北约 12km 处通过,该断裂在惠州市北部呈正断层性质,构成中、新生代红色盆地,断层倾角中等,活动性不大明显。沿该断裂发生的近期地震主要是 1934 年,在惠州市北部博罗县境响水一罗营地区发生一次 V 度地震,

1970年由广州地震大队地震综合队对该地震进行调查、分析,证明该地震不受河源深断裂带控制,而与紫金一博罗大断裂带有成因上的联系,其发震位置是该断裂与另一断裂交汇的断裂闭锁区。

3.3.5 深部热源分析及温度预测

据区内 MT 测量数据(图 9),紫金一博罗大断 裂处出现明显的软流圈隆起现象,说明该断裂带附近下地壳已经出现热扰动,由此将导致区域大地热流增大。研究区距离紫金一博罗大断裂约 12km,其背景热流值也将受其影响;另外,钻孔所发现的喜山期两火山岩脉的侵入,也反映中上地壳的热状态已经受软流圈隆所影响。

综上所述,区内深大断裂作为岩石圈或上地壳的弱化带,在多期次构造运动中,都会出现不同程度的活动,这有利于形成深部导水裂隙,地下水也就可以获得深循环而增温;区内存在相对较高的地热增温率,其原因可能是:一是该区中地壳可能存在局部的高导低阻体(层),为受下地壳热扰动的的结果;二是研究区的浅部可能存在隐伏的新生代中酸性侵入岩体,虽然规模不是很大,且已经固结成岩,但尚存在岩浆余热。

根据研究区内 ZK4 井水样的化学分析结果,ZK4 井孔深 88.00m,孔底温度 55.0 ℃,偏硅酸含量 172.64mg/L,采用无蒸汽损失石英温标进行估算,深部热储温度为 142.4 ℃。按 3.5 ℃/100m 的地温梯度计算,热水循环深度为 4000m。

3.4 海南陵水

海南岛地处欧亚板块、印度板块和太平洋板块的交接部位,大地构造位置独特,岩浆活动强烈,侵入岩分布占据了全岛总面积的 40%以上(Liu Yuheng et al., 2015; Gao Wei et al., 2016)。在这些广泛分布的侵入岩中,以屯昌岩体、千家岩体和保城岩体为代表的一系列燕山晚期花岗岩体因与洋壳俯冲作用关系密切而倍受关注。其中,保城花岗岩体属燕山期花岗岩体,为全岛规模较大,厚度较大的花岗岩体(最大延深 8400m)。

3.4.1 基底分布

(1)酸性岩浆岩体分布及规模

研究区内出露的岩浆岩主要为晚白垩世保城岩体,位于海南岛东南部加茂镇一文罗镇一本号一大坡一带,处于近东西向九所一陵水断裂带东端,岩体总体呈近东西向展布,长34km,宽14km,地表出露面积868km²。岩体自外向内由加茂细中粒角闪黑云花岗闪长岩、保亭细中粒含斑角闪黑云二长花岗

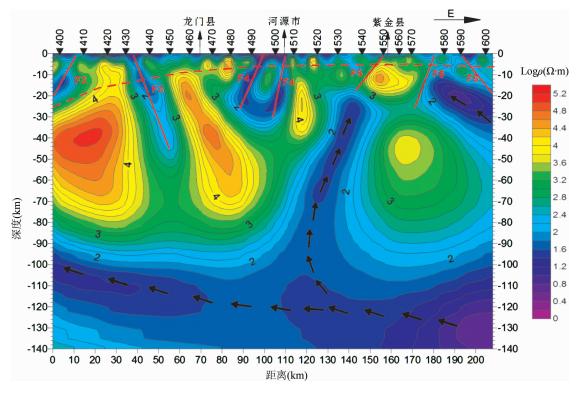


图 9 广东惠州地区 MT 测线解译成果图

Fig. 9 Interpreted profile of MT measurement along the Huizhou area

岩、六弓粗中粒斑状黑云母二长花岗岩组成,呈环套状产出。

保城岩体各侵入体形成年龄由外向中心变新, 呈完整的近东西向长圆形环套状产出,形成年龄接近,并根据野外接触关系,脉动式岩浆活动,保城岩体侵位时代为102~107Ma。

(2)酸性岩浆岩体放射性生热率

表 5 为保城岩体花岗岩放射性元素含量,可以看出,保城岩体花岗岩 $Th_{\nu}U_{\nu}K_{\nu}O$ 含量均高于全国平均值与世界平均值,放射性生热条件是全岛白垩纪花岗岩体最好的,岩体放射性生热率最高,具有较好的干热岩选区条件。

表 5 保城岩体花岗岩放射性元素含量对比一览表

Table 5 Radioactive element content of Baocheng granite

类型	元素	保城岩体(mk/kg)			海南岛平均值	全国岛平均值	世界平均值
	儿系	最高值	最低值	平均值	(mk/kg)	(mk/kg)	(mk/kg)
花岗岩(基岩)	Th	55	16.70	23.65	19.50	14.89	18.00
	U	11	3. 21	5. 74	5.04	3. 19	3.50
	K ₂ O	5. 31	3. 36	4.07	3. 57	2. 38	3. 13

注: K2O单位为%。

3.4.2 盖层分布情况

研究区为二元结构,上部地表主要分布花岗岩 风化土,厚度为几米到十几米不等,其下伏为花岗岩 体,且在五指山地区覆盖有中生代盆地,具备一定的 盖层条件。

3.4.3 热异常分析

(1)地温梯度

研究区地处太平洋板块的边缘地带,地质构造复杂,地热资源相当丰富,据收集到的有关资料表

明,有 1/3 的地区地热梯度超过 $5 \, \mathbb{C}/100 \, \text{m}$,局部达 $11.2 \, \mathbb{C}/100 \, \text{m}$ 。

区内最大勘探深度为 646.72m(ZK11 孔),位于保亭新村(七仙岭),孔内测温曲线见图 10,在一 200m 标高以上,温度随孔深增加比较快,平均梯度 16.7%/100m,孔从一 200m~一 500m 标高,温度的增加较少,略高于正常增温率,梯度为 3.9%/100m。

(2)大地热流特征

根据收集到的华南地区大地热流数据,研究区

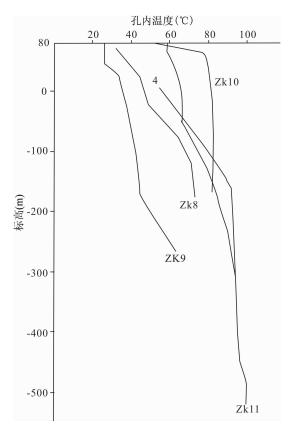


图 10 保亭新村 ZK11 地热井测温曲线

Fig. 10 Temperature logging in ZK11 borehole, Baotingxin

热流密度值为 $70\sim80\,\mathrm{mw/m^2}$,高于中国大陆平均热流密度值 $61\,\mathrm{mw/m^2}$,是一个具有高热流背景的地区。

3.4.4 区域稳定性分析

海南岛的活动断裂主要分布在王五一文教断裂以北的琼北断陷盆地区,其他地区则表现为老断裂的继承性活动。研究区断裂构造不甚发育,以规模较小的北西向断裂为主,在第四纪以来的活动不明显,主要表现为部分断裂的再次活动控制了温泉的发育。根据广东省地震局 1986 年所做的海南省地震烈度区划,研究区地震烈度为 VI 度,地震活动不活跃。根据海南岛的历史地震震中分布,研究区及邻区无4级以上强震活动,小震活动也较弱,研究区仅六弓南西廖次岭一带及陵水东部近海一带零星发育。

3.4.5 深部热源分析及温度估算

根据研究区剩余重力异常三维定量反演资料, 其圈定的保城岩体范围(1690km²)比地表出露 (868km²)的范围大很多,在其研究区的北东部和西 北部该岩体隐伏于二叠纪花岗岩体中,在其东南部 和西南部则隐伏于三叠纪花岗岩体中。同时,剩余 重力异常三维定量反演结果显示保城岩体有两个岩浆通道,分别位于测区东部陵水南平地热田附近和测区西部的保亭加茂镇东南侧一带(Zhang Qian et al.,2015)(图 11)。其中,位于测区东部陵水南平地热田附近的岩浆通道可能与南平地热田有关,而位于测区西部的保亭加茂镇东南侧一带的岩浆通道处于保城岩体与三叠纪花岗岩体的接触带附近,该岩浆通道很可能被出露地表的三叠纪花岗岩覆盖。因此,该岩浆通道具有较好的盖层。

利用地球化学温标计算区内七仙岭、石硐、南平等温泉的热储温度,结果见表 6,热储范围 $113 \sim 151 \, ^{\circ}$ 。考虑到地表冷水的混合作用,该热储温度相对保守。

表 6 地球化学温标计算结果表

Table 6 Temperature of geothermal reservoir for different hot springs in Lingshui

温泉名称	计算方法	取样日期 (年月)	元素含量 (mg/L)	计算结果 (℃)
七仙岭温泉	→ /= /l+ r+	2010. 3. 29	81.69	126
石硐温泉	二氧化硅 地热温标	2008. 4. 15	63.7	113
南平温泉	地於価事	2010. 3. 29	72.01	120
七仙岭温泉	Ettl Erle tele 4:4e	2010. 3. 29	K2. 63, Na59. 07	136
石硐温泉	伊钠地热 温标	2008. 4. 15	K1.7, Na58.0	151
南平温泉	11111 7/1	2010. 3. 29	K4. 22 Na109. 4	143

4 最优靶区讨论

广东阳江新洲、惠州黄沙洞,雷琼断陷盆地以及海南陵水地区均表现出较好的地热异常与干热岩资源可开发前景,将四处目标区列表如下,进行对比(表7)。可以看出,雷琼断陷盆地具有较高的地温梯度与 4000m 深度温度,可能与雷琼地区具有新生代火山活动相关;盖层发育,根据已有资料,3000m 深度温度大于 140℃,因此可优选为东南沿海地区干热岩资源勘查开发优先靶区。

5 结论

- (1)综合考虑干热岩赋存的地热地质背景,在参考国外相关干热岩开发利用选址的基础上,建立了包括基底岩体分布、地表盖层条件、地热异常、应力条件以及区域稳定性等几个方面的干热岩赋存的地热地质学指标。
- (2) 在综合论述我国东南沿海酸性岩体分布、 大地热流分布、岩石放射性生热率、深度温度场的基础上,结合干热岩赋存的地热地质学指标,针对广东 阳江新洲热田、广东惠州黄沙洞热田、雷琼断陷盆

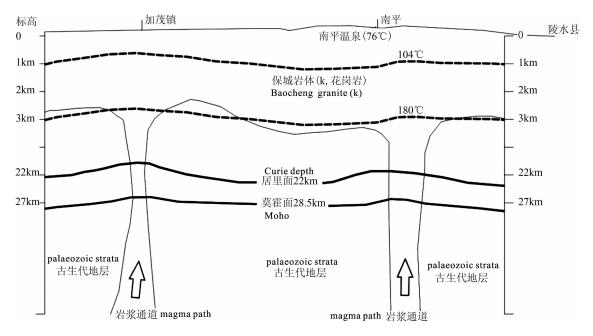


图 11 保城岩体概念模型示意图

Fig. 11 Concept model of Baocheng granite body

表 7 东南沿海重点目标区干热岩赋存地热地质学相关指标

广东新洲 广东惠州矮陂 雷琼断陷盆地 海南陵水 指标 基底岩石类型 黑云母花岗岩 花岗闪长岩 花岗岩 保城岩体 单位体积生热率 5. $75 \mu W/m^3$ $>4.9 \mu W/m^3$ 2. $8 \sim 4.9 \mu W/m^3$ 岩体规模(地表出露面积) 600 km^2 $28.83 \, \mathrm{km}^2$ 1238.645 km^2 868 km^2 岩体形成时代 燕山期 燕山期 燕山期 燕山期 地温梯度 4.2°C/100m 3.5 \sim 4.0°C/100m $3\sim7^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ >5°C/100m $70 \sim 80 \, \text{mW/m}^2$ $> 73 \text{mW/m}^2$ 62.6 \sim 71.3 mW/m² $70 \sim 80 \, \text{mw/m}^2$ 地表热流值 第四系、第三系巨厚 盖层分布 盖层不够理想 存在,厚度>30m 具备一定的盖层条件 盖层,>2000m 深部热源 深部存在大面积低阻带 不明 琼北深部存在低阻体 存在两个岩浆通道 热储温度 166℃ 142.4°C 雷州半岛 3150m 温 146.4℃ 151°C 雷琼地震带上,低震级 地震烈度为VI度, 区域稳定性 地震老震区,地震强度不大 活动断裂区,地震活动较弱 地震活动较频繁 地震活动不活跃

Table 7 Geothermal-geological index of HDR for different target areas

地、海南陵水等干热岩资源靶区,从区内酸性岩体分 布、盖层情况、深部热异常以及区域稳定性等几个方 面分析了干热岩赋存及开发的可能条件,提出了可 能的深部热源,并估算了深部热储温度,可作为今后 我国东南沿海干热岩资源开发利用的重点调查 靶区。

- (3) 雷琼断陷盆地具有较高的地温梯度与 4000m 深度温度,盖层发育,可作为东南沿海地区 干热岩资源勘查开发的优先靶区。
- (4)干热岩资源勘查主要是查明靶区基地起伏、 区域性控制断裂构造、侵入体分布以及深部电性差 异等,建议在今后工作中重点选取重力、磁法、电法、 以及地震等地球物理勘查方法进一步开展上述靶区 干热岩赋存条件调查,为区内干热岩科学钻探提供

科学依据。

References

- Baria R, Baumgä J, Gerard A, Jung R, Garnish J. 1999. European HDR research programme at Soultz-sous-Forêts (France) 1987-1996. Geothermics, 28(4): 655~669.
- Brown D W. 1995. The US Hot Dry Rock Program-20 years of experience in reservoir testing. Italy: Proceedings of World Geothermal Congress, 2607~2611.
- Brown D W, Duchane D V. 1999. Scientific progress on the Fenton Hill HDR project since 1983. Geothermics, 28 (4 \sim 5): 591 $\sim 601.$
- Chen Moxiang, Xia Sigao, Yang Shuzhen. 1991. Local Geothermal anomalies and their formation mechanisms on Leizhou Peninsula, South China. Scientia Geologica Sinaca, (4): 369~ 382(in Chinese with English abstract).

- Chopra P, Wyborn D. 2003. Australia's first hot dry rock geothermal energy extraction project is up and running in granite beneath the Cooper Basin, NE South Australia[C]//Proceedings of the Ishihara Symposium: Granites and Associated Metallogenesis. 43~45.
- Cornet F H. 1987. Results from Le Mayet de Montagne project. Geothermics, 16(4): 355~374.
- Deng Jinfu, Feng Yanfang, Di Yongjun, Liu Cui, Xiao Qinghui, Su Shang Guo. 2016. The instrusive spatial temporal evolutional framework in the southeast China. Geological Review, 62(1): 3 ~16(in Chinese with English abstract).
- Gao Wanli, Wang Zongxiu, Li Chunlin, Wang Duixing. 2014.
 Zircon U Pb Geochronological, Geochemistry and tectonic implication of Indosinian Granite from southeastern Zhejiang, South China. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1055 ~ 1067 (in Chinese with English abstract).
- Gao Wei, Shu Qing, Xie Shunsheng, Cai Shuiku. 2016. Aeromagnetic Anomalies of Cenozoic Volcanic Structure in Northern Hainan Island and Its Geological Significance. Geological Review, 62(1): 235~247 (in Chinese with English abstract).
- Genter A, Traineau H. 1996. Analysis of macroscopic fractures in granite in the HDR geothermal well EPS-1, Soultz-sous-Forêts, France. Journal of volcanology and geothermal research, 72(1): 121~141.
- Grigsby C O, Tester J W. 1989. Rock-water interactions in the Fenton Hill, New Mexico, hot dry rock geothermal systems. II. Modeling geochemical behavior. Geothermics, 18 (5): 657 ~676.
- Hu Jiuchang, Bai Denghai, Wang Weihua, Wang Lifeng, He Zhaohai, Han Jimin. 2007. Magnetotelluric Surveying and Electrical Structure of the Deep Underground Part in Leiqiong Volcanic Area. South China Journal of Selsmology, 27(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 1994. Heat flow characteristics of orogenic belts in southeastern China. Geological Review, 40(5): 387~394(in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). Chinese Journal of Geophysics, 44 (5): 611 ~ 626 (in Chinese with English abstract).
- Hunt S P, Morelli C. Cooper Basin HDR hazard evaluation:

 Predictive modeling of local stress changes due to HFR
 geothermal energy operations in South Australia. [2015-03-31].

 http://www. iea-gia. org/documen-ts/
 inducedSeismicityReportSHuntDraftOctober2006Malvazos4Jan07.
 pdf. 2006.
- Kappelmeyer O, Jung R. 1987. HDR Experiments at Falkenberg/Bavaria. Geothermics, 16(4): 375~392.
- Li Fu. 2010. Exploration and site selection of HDR power project in Lingshui, Hainan. Geothermal Energy, (3): 21~27(in Chinese with English abstract).

- Li Jianhua, Zhang Yueqiao, Dong Shuwen, Johnston S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: a preliminary synthesis. Earth-Science Reviews, 134: 98~136.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. An Estimation of HDR Resources in China's Mainland. Acta Geoscientica Sinica, 33(5): 807 ~ 811 (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. Science & Technology Review, 33(19): 28~34(in Chinese with English abstract).
- Liu Yuheng, Li Baolong, Cao Xu, Luo Maocheng, Zhou Wenlin. 2015. Ore-forming fluid characteristics of Jinchang Gold deposit Island and its constraint on ore genesis, Hainan Island, China. Acta Geoscientica Sinica, 89(14): 755~765 (in Chinese with English abstract).
- Olasoloa P, Juáreza M C, Moralesb M P, Sebastiano D A, Liarte I A. 2016. Enhanced geothermal systems (EGS): A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, (56): 133~144.
- Parker R, 1999. The Rosemanowes HDR project 1983 1991. Geothermics, $28(4\sim5)$: $603\sim615$.
- Qiu Nansheng. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of northwest China. Chinese Journal of Geology, 37(2): 196~206(in Chinese with English abstract).
- Rybach L, Bodmer P, Pavoni N, Mueller S. 1978. Siting Criteria for heat extraction from hot dry rock: Application to Switzerland. Pageoph, 116: 1211~1224.
- Tenma N, Yamaguchi T, Zyvoloski G. 2008. The Hijiori hot dry rock test site, Japan: Evaluation and optimization of heat extraction from a two-layered reservoir. Geothermics, 37(1): 19~52.
- Wallroth T, Eliasson T, Sundquist U. 1999. Hot dry rock research experiments at Fjällbacka, Sweden. Geothermics, $28(4 \sim 5)$: $617 \sim 625$.
- Wang Dezi, SHEN Weizhou. 2003. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China. Earth Science Frontiers, 10(3): 209~220(in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, 2012. Estimate of Geothermal Resources Potential for Hot Dry Rock in the Continental Area of China. Science & Technology Review, 30(32): 25~31(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueqiu. 2008. A joint research of Hot Dry Rock resources between China and Australia. Journal of Geology, (3): 253(in Chinese with English abstract).
- Yan Weide. 2015. Characteristics of Gonghe Basin hot dry rock and its utilization prospects. Science & Technology Review, 33(19): 54~57(in Chinese with English abstract).
- Zeng Siyun, Zhao Dexi, Li Lichang, Wang Ye, Yang Yuhang, Ma Qianyun. 2010. Technology on Cementing of Deep Well

- Production Casing in Fushan Oil Field Hainan. Drilling Fluid & Completion Fluid, 27(6): $52 \sim 54$ (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qian, Wu Xiaojie, Xie Shunsheng, Han Zhi, Zhang Zhan. 2015. The application of comprehensive geophysical methods to exploration of Hot Dry Rock resources in Lingshui area of Hainan. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 12(4): 477 ~483(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hailing, Deng Jinfu, Li Kaiming, Li Yonghua. 1999. Cenozoic Volcanism in the Southeast Coast of China and the South China Sea and the Formation and Evolution of the South China Sea. Geological Review, 45(7): 809~816(in Chinese with English abstract).
- Zhao Hailing, Di Yong jun, Liu Zhenwen, Li Jian, Deng Jinfu, He Gongsuan. 2004. Cenozoic Volcanism and Mantle Plume along Southeast Coast of China. Acta Geologica Sinica, 78(6): 781~788(in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. Characteristics of heat production distribution in SE China. Acta Petrologica Sinica, 11(3): 292~305(in Chinese with English abstract).

参考文献

- 陈墨香,夏斯高,杨淑贞. 1991. 雷州半岛局部地热异常及其形成机制. 地质科学,(4): 369 \sim 382.
- 邓晋福, 冯艳芳, 狄永军, 刘翠, 肖庆辉, 苏尚国. 2016. 华南地区 侵入岩时空演化框架. 地质论评, 62(1): 3~16.
- 高万里, 王宗秀, 李春麟, 王对兴. 2014. 浙东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及意义. 地质学报, 88(6): 1055~1067.
- 高维,舒晴,谢顺盛,蔡水库. 2016. 琼北新生代火山构造的航磁异常特征及其地质意义. 地质论评,62(1): 235~247.
- 胡久常,白登海,王薇华,王立风,何兆海,韩吉民. 2007. 雷琼火山区地下深部大地电磁探测与电性结构分析. 华南地震,27 (1):1~7.
- 胡圣标, 汪集旸. 1994. 中国东南地区各造山带大地热流特征. 地

- 质论评,40(5):387~394.
- 胡圣标,何丽娟,汪集旸. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编 (第三版). 地球物理学报,44(5):611~626.
- 李福. 2010. 海南陵水地区深层干热岩地热发电项目的勘查选址. 地热能,(3): 21~27.
- 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, 地球学报,33(5): 807~811.
- 蔺文静,王凤元,甘浩男,马峰,王贵玲等. 2015. 福建漳州干热岩 资源选址与开发前景分析,科技导报,33(19): 28~34.
- 刘昱恒,李宝龙,曹煦,罗茂澄,周文林. 2015. 海南金昌金矿成矿 流体特征及其对矿床成因的制约. 地质学报,89(4):755~765.
- 邱楠生. 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征. 地质科学, 37(2): 196~206.
- 王德滋, 沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 汪集旸,胡圣标,庞忠和,何丽娟,赵平,朱传庆. 2012. 中国大陆 干热岩地热资源潜力评估. 科技导报,30(32):25~31.
- 徐雪球. 2008. 中澳联合研究江苏干热岩地热资源. 地质学刊, (3): 253~253.
- 严维德. 2015. 共和盆地干热岩特征及利用前景. 科技导报, 33 (19): 54~57.
- 曾思云,赵德喜,李立昌,王野,杨豫杭,马倩芸. 2010. 海南福山油田深井油层套管固井技术. 钻井液与完井液,27(6):52~54
- 张前,吴小洁,谢顺胜,韩之,张展. 2015. 综合物探方法在海南陵 水地区干热岩资源勘查中的应用. 工程地球物理学报,12(4): 477~483.
- 赵海玲,邓晋福,李凯明,李永华. 1999. 东南沿海及南海新生代火山作用与南海的形成演化,地质论评,45(7):809~816.
- 赵海玲, 狄永军, 刘振文, 李剑, 邓晋福, 何恭算. 2004. 东南沿海 地区新生代火山作用和地幔柱. 地质学报, 78(6): 781~788.
- 赵平. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报, 11 (3): 292~305.

Occurrence Prospect of HDR and Target Site Selection Study in Southeastern of China

LIN Wenjing, GAN Haonan, WANG Guiling, MA Feng
Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, 050061

Abstract

Hot dry rock (HDR) geothermal resource is one of the most important clean energy in future. Site selection a HDR resource is a fundamental work to explore the HDR resources. This paper compiled all the HDR development projects domestic and abroad, and summarized the location of HDR geothermal geological index. After comparing the geological background of HDR in the southeast coastal area of China, Yangjiang Xinzhou in Guangdong province, Leizhou Peninsula area, Lingshui in Hainan Province and Huangshadong in Guangzhou were selected from some key potential target area along the southeast coast of China. Deep geothermal field model of the study area is established based on the comprehensive analysis of the target area of deep geothermal geological background and deep thermal anomalies. This paper also compared the hot dry rock resources target locations, and proposed suggestions for the priority exploration target area and exploration scheme.

Key words: Hot dry rock; acid intrusive bodies; target site selection; index matrix; southeastern of China