

广东清远三坑地热田地质特征及勘查实践

罗文行^{1,2,3}, 房艳国¹, 龚成¹, 李茂华¹, 胡祥云^{2,3}

(1. 长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 地球内部多尺度成像湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要:为分析三坑地热田的地质特征, 准确找到其最佳开发位置, 采用多种方法对该地热田的某新工区进行了综合地热勘查。勘查结果表明: 三坑地热田热储类型为岩溶裂隙-断裂构造型, 地下水受断裂构造控制, 呈带状分布, 并具有明显的方向性和不均一性, 赋存条件比较复杂; 地热系统中的热、储、盖、通 4 要素, 盖层不是必须的, 如果有很好的热源、热通道和水源, 盖层很薄甚至没有都可能存在可供经济开采的地热水资源; 在深度 500 m 以内中浅层地热勘查中, 将可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)与浅孔测温相结合, 可显著提高勘探成功率。

关键词: 地热勘查; CSAMT; 浅孔测温; 三坑地热田; 广东

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.14.008

地热资源是一种综合性资源, 中低温地热水被作为液体矿产而开采, 高温地热水和蒸汽作为一次能源进行发电。近年来, 由于空气污染和能源短缺, 人们对清洁能源的关注度越来越高。地热能作为一种清洁环保的能源, 与其他新能源相比具有明显的优势: 不受气候气象和昼夜季节变化的影响, 可以连续不断地提供能源^[1]。我国对地热的直接开发利用一直走在世界前列, 但地热资源的勘查工作却相对滞后, 这导致地热利用市场混乱, 开发利用规划不合理, 浪费严重^[2]。

广东省地热资源丰富, 然而开发利用程度却不高, 目前全省地热水开采量为 $1.4165 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{a}$, 位列全国第 8 位^[3]。这主要是受两个方面因素的限制: ① 温泉主要出露于山前平原、山间盆地和河谷地带, 地形地貌条件影响温泉的开发利用; ② 区内地热研究程度较低, 以往仅对广州从化温泉进行过系统研究。

清远三坑地热田由广东省地质物探工程勘察院发现, 随后展开了一系列研究, 分析了其地热开发潜力^[4-5]。该地热田在 1997 年已由当地政府引进港资开发, 2013 年拟扩大开发规模。受其委托, 长江三峡勘测研究院(以下简称三峡院)在新的用地范围内进

行了地热勘查, 成功获取了温度为 46°C 、水量大于 $600 \text{ m}^3/\text{d}$ 的地热水资源。本文在勘查实践的基础上, 分析了三坑地热田的地质特征, 并总结了地热勘查经验, 可为日后的地热勘查工作提供参考。

1 区域地质背景

广东省在大地构造上属华南褶皱系的一部分, 其演化过程经历了 3 个发展阶段: 加里东运动形成紧密线型褶皱, 主要呈 NEE 方向, 成为广东省构造骨架的基础; 印支运动形成多方向的过渡型盖层褶皱; 燕山运动以断块造山、NE 向和 EW 向深大断裂控制的火山喷发、岩浆侵入为主。从总体上看, 境内大型褶皱和大规模断裂以 NE 向为主, 间夹 EW 向和 NW 向构造组成。

广东省境内的地热资源分布严格受断裂构造的控制, 温泉绝大部分位于北东向断裂与北西向断裂交汇处^[3]。北东向断裂是控热构造, 北西向断裂是导热构造, 热储范围往往是两组断裂交汇地带。北东向的吴川-四会断裂带、恩平-新丰断裂带、河源断裂带、莲花山断裂带、潮安-普宁断裂带及汕头-惠来断裂带上分别有 20, 17, 17, 31, 8 和 3 处温泉产出; 东西向的

佛冈-丰良断裂带和高要-惠来断裂带上分别有 30 和 36 处温泉产出。

清远三坑地热田就发育在吴川-四会断裂带北东侧,与该断裂带密切相关。居里等温面(约 560℃)埋深图(与习宇飞博士个人交流)上也显示,在清远一带存在一个局部的居里等温面凸起,说明其有较好的地热形成深部背景。

2 区域地热地质条件

2.1 热源

吴川-四会断裂带是一条北东向横穿广东全省的大型断裂带(广东省地质志),总体走向 NE20°~40°,影响宽度 15~20 km。该断裂带为活动性断裂,主要表现为地震频繁,水热活动明显,有多期岩浆活动及强烈动力热变质的明显迹象。据不完全统计,断裂带及其邻侧,历史上曾频繁发生过地震,其中,大于 4.75 级的 8 次,3~4.75 级的 86 次,小于 3 级的超过 5 000 次,每年释放能量 68.5 TJ。沿断裂带走向共见 20 多处温泉出露,最高水温达 81℃。由此可见,该断裂带深部蕴藏着岩浆、放射性物质衰变和断层活动摩擦等多种成因的热源。

2.2 控热构造

三坑地热田处于北东向大坑口断层和北西向九牛洞断层交汇处附近(见图 1)。大坑口断层为逆断层,位于三坑向斜的北西翼,中部因受九牛洞断层切割错动而被分成南北两段。九牛洞断层为正断层,也位于三坑向斜的北西翼,横切北东向大坑口逆断层,两侧岩石张性裂隙发育,部分地段可见规模较大的断层崖。

大坑口断层是吴川-四会断裂带的主要分支断层之一,规模大,延伸长,切割了深部增温层,为储热断裂;九牛洞断层是切割大坑口断层的正断层,张性裂隙发育,为导热断裂。三坑向斜盆地内也发育 NE 向和 NW 向两组隐伏断裂,沿断裂走向,特别是两组断裂交汇部位,岩溶裂隙发育。这些情况说明,地热田具备了储热、导热断裂构造条件。

2.3 热储

三坑地热田的热储构造为三坑向斜,轴线走向大致为 NE 30°。三坑向斜两翼地层为中下泥盆统桂头群(D_{1-2gt}),岩性以石英砂岩为主,以丘陵山地形式出露于地表;向斜核部地层为中泥盆统老虎坳组(D_{2l}),下中部为砂岩、页岩,上部为灰岩,分布于中部三坑河冲洪积平原中,形成良好的向斜岩溶盆地热储构造(见图 1)。

热储层的岩性以老虎坳组(D_{2l})灰岩为主,少部

分为桂头群(D_{1-2gt})石英砂岩。灰岩普遍呈深灰色,隐晶质微粒结构,块状构造,矿物成分主要是方解石,含少量白云石和碳质,部分地段见挤压碎裂和大理岩化现象。灰岩岩溶裂隙发育,溶洞较多,且溶洞内普遍有充填物(砂土类为主),但也有少量为空(充水)。桂头群(D_{1-2gt})石英砂岩在断裂带部位呈强风化和中风化状,裂隙发育。

在勘查区南侧,前人的地热调查和勘探发现,热储层的顶面埋深为 10.80~65.10 m^[5-6]。热储层介质以岩溶裂隙为主,其发育程度主要受 NE 和 NW 两组断裂控制,岩溶裂隙发育深度为 14.50~62.20 m。岩溶裂隙发育带在平面上呈“<”形的带状分布。地下热水主要赋存于三坑向斜的岩溶裂隙中,热储类型属岩溶-裂隙型。由于岩溶发育深度较浅,大部分溶洞又有较多充填物,因此,地下热水主要富集在浅部溶蚀裂隙发育带中。地下热水受断裂构造和岩溶裂隙发育、充填情况的控制影响,呈带状分布,并具有明显的方向性和不均一性,赋存条件比较复杂。

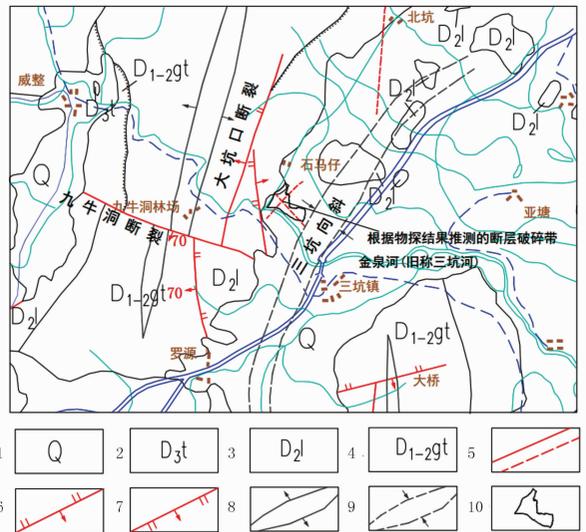


图 1 三坑地热田勘查区周边地质构造

注:1. 第四系;2. 上泥盆统天子岭组灰岩;3. 中泥盆统老虎坳组灰岩夹砂岩;4. 中、下泥盆统桂头群石英砂岩夹砾岩;5. 实测/推测性质不明断层;6. 逆断层;7. 正断层;8. 背斜;9. 向斜;10. 本次地热勘查用地范围

3 勘查实践

3.1 地质调查和地球物理勘探

本次勘察时,在工区西侧基岩出露区发现一条近南北向展布的逆断层,与区域上大坑口断裂展布方向略有夹角,但可认为其为大坑口断裂的分支。该断裂距离场区较近,会对场区范围内的水热系统产生一定影响。

通过可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)勘探,

在勘查区范围内还发现了北东和北西向两条近似垂直相交的低阻带(见图2),结合地质构造背景,我们推测其为两条隐伏断裂带或者岩溶裂隙破碎带,带内灰岩溶蚀构造和裂隙密集发育,岩石较为破碎,是良好的热水通道。后续的浅孔钻探和深孔勘探结果验证了以上推测。

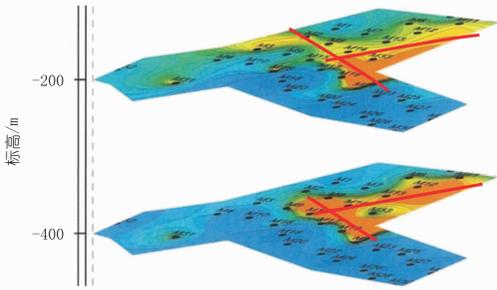


图2 CSAMT地球物理勘查结果(部分)

3.2 浅孔钻探与地温测量

根据地质调查结果和前期物探结果资料分析,在地热有利部位选择7处实施浅孔钻探,并进行孔内测温。

根据勘探浅孔揭露成果,并结合已收集的200多个工程钻孔资料,按成因类型、岩土性质,将区内地层由上至下分为:①第四系人工填土层;②第四系冲洪积层;③第四系残积层;④中泥盆统老虎坳组灰岩。热储层为含溶蚀孔洞和裂隙的灰岩,而盖层为第四系中的黏土层或者灰岩全风化残积层,为较致密细粒碎屑沉积物,透水性较差。各个钻孔揭露的盖层厚度变化很大,有的较厚,达到十几米;而有的钻孔甚至没有盖层。地下水位面基本保持水平,没有大的起伏;黏土盖层(保温层)和热储层灰岩的埋深变化较大,西南部较深,北部和东部较浅。

7个浅孔的孔内测温结果显示,各钻孔20~30m之间增温率较为一致(见图3),表明20m以下水温受地表太阳辐射的影响不大,与该地区地下热异常关系密切;25m以下,由于部分钻孔遇到溶洞或者土洞,对地温有一定的干扰。

在小口径勘探孔(SZK1)钻进至86m之后停钻1d,然后进行孔内测温,测温结果见图4。可以看出,在深度为15m左右时,孔内温度就已达43℃,再往深处,温度虽有起伏,但总体上基本都高于43℃,只有60m深度一个点为42.5℃。23~38m之间的孔内温度达到约48℃,是第一个高温孔段,之后向下至60m左右,温度下降到42.5℃,从60m继续向下,温度开始逐步回升,到85m深处温度达到最高的48.7℃。图4中曲线从62m开始直至孔底,孔内温度基本呈线性上升趋势,可以推测深部温度可能会更高。测温结果显

示,场区内地热异常强烈,而且热储层较浅。

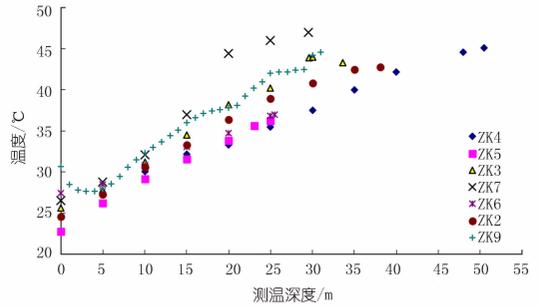


图3 清远三坑地热田勘查区浅孔测温结果

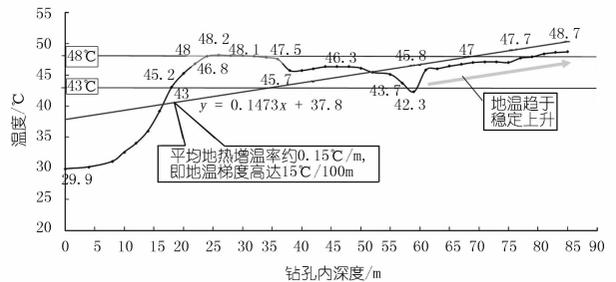


图4 清远三坑地热田勘查区SZK1孔测温结果

4 抽水试验

生产井SZK1孔深216.45m,洗孔后开始进行72h系统的单井抽水试验,试验结果见表1。其中,抽水时间、水位降深和涌水量通过试验记录和简单计算获得;单位涌水量为井内水位每下降1m所产生的涌水量,影响半径根据经验数据并参考经验公式计算获得,渗透系数根据经验公式 $k = Q/(2\pi S_M) \times (\lg R/r)$ 计算。

表1 抽水试验结果

| 序号 | 抽水时间/ h | 水位降深/ m | 涌水量 (L/s) | 单位涌水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$) | 渗透系数/ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) | 影响半径/ m |
|----|------------|------------|--------------|--|---|-----------------------|
| 1 | 22 | 0.30 | 7.60 | 656.64 | 25.333 | 8.94×10^{-3} |
| 2 | 24 | 0.35 | 8.80 | 760.32 | 25.143 | 8.95×10^{-3} |
| 3 | 24 | 0.40 | 10.05 | 868.32 | 25.125 | 9.04×10^{-3} |

注:水位测量基准点以地面计。

经计算,当SZK1温泉井开采量设定为 $600 \text{ m}^3/\text{d}$,水温 46°C 时,100a可开采总热量为 $0.67 \times 10^{12} \text{ Kcal}$,单位面积可采热量为 $7.16 \times 10^5 \text{ Kcal}/\text{m}^2$,开采影响面积为 $9.36 \times 10^5 \text{ m}^2$,温泉井保护距离为1092m。

5 结果讨论

地热勘查工作的最终目的是找到最佳的开发地点,以便经济地获得满足要求的地热资源。具体到本文研究区,就是要建成一口控制性温泉生产井,并满足水温和水量的要求。因此,如何确定温泉生产井的位置非常重要。这需要针对勘查对象区特点,采用地质

调查、地球物理勘探、水文地质调查和浅孔勘探等多种方法进行综合勘查^[6]。

从本次勘查实践成果来看,确定井位的主要依据有:① 周边地质构造调查和水文地质调查结果,初步查明了对勘查区地下热水具有控制作用的断裂、破碎带等构造形迹和地下水补给与排泄通道等情况;② 地质资料分析和实地调查结果,对前期物探工作结果进行分析,做出合理的地质解释,初步判断地下储水构造的分布位置,布置浅孔进行勘探和测温工作;③ 浅孔测温结果分析,绘制勘查区地温等值线图,初步查明勘查区地下温度场特征。

该项目中,前期物探获得的可控源音频大地电磁测深(CASMT)反演剖面结果显示:勘查区内存在一条规模较大的一个低阻体,推测为含水层。浅孔测温结果表明,勘查区内北北东向的一条地温异常带,正好经过该低阻体。综合考虑水量(低阻体规模)和水温(距温度异常中心的距离)条件,布置温泉生产井的位置,最终获得了满意的勘查结果。

6 结论

(1) 地热系统中的热、储、盖、通 4 要素,盖层不是必须的,如果有很好的热源、热通道和水源,盖层很薄甚至没有盖层都可以获得可经济开采的地热水资源。

(2) 三坑地热田的热储类型为岩溶裂隙加断裂破碎带型,隐伏断裂对地热资源的输导有重要作用,这在地热田的勘查中对隐伏断裂的探测和研究非常关键。

(3) 在深度 500 m 以内中浅层地热勘查中,将可控源音频大地电磁测深与浅钻孔孔内测温相结合的方法可大大提高勘探成功率。

该区地热资源比较丰富,但又有一定的限度。在今后的开发利用中,应有计划地开采,并注意温泉井开采保护距离。如果开采量加大,应合理布设地热回灌井,实现地热资源的可持续利用。

参考文献:

- [1] 庞忠和,胡圣标,汪集旸. 中国地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2012, (32): 18-24.
- [2] 汪集旸,龚宇烈,陆振能,等. 从欧洲地热发展看我国地热开发利用问题[J]. 新能源进展, 2013, (1): 1-6.
- [3] 李德荣. 广东省地热资源现状及开发前景展望[J]. 地热能, 2004, (4): 22-27.
- [4] 叶闻文. 广东三坑地热田形成条件及开发潜力分析[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(3): 16-18.
- [5] 刘俊洪,陈斌,何振邦. 广东省清新县三坑地热田的勘查发现与开发前景[J]. 地质与勘探, 2004, 40(z1): 45-48.
- [6] 林进宏. 综合方法在地热勘查中的应用[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(1): 121-123.

(编辑:胡旭东)

Study on geological characteristics of Sankeng geothermal field in Qingyuan, Guangdong Province and investigation practice

LUO Wenxing^{1,2,3}, FANG Yanguo¹, GONG Cheng¹, LI Maohua¹, HU Xiangyun^{2,3}

(1. Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China; 2. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Hubei Subsurface Multi-Scale Imaging Lab (SMIB), China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to analyze the geological characteristics of Sankeng geothermal field, so as to find out the best development position accurately, the geothermal exploration on a new working area of this field in Qingyuan City was conducted by using comprehensive methods. The exploration results show that the geothermal reservoir type of Sankeng geothermal field is karst fractured-fault zone. The underground hot water storage controlled by faults is complex with zonal distribution and has a clear direction and heterogeneity. Furthermore, the cover layer is not necessary among the four factors (heat source, reservoir, seal, channel and cover) in the geothermal systems. If the heat source, thermal channel and water resource are good, a geothermal water resources for economic exploitation may exist even without a cover layer or with a thin cover layer. Within 500 meters of shallow geothermal exploration, CSAMT supplemented by shallow hole temperature measuring can increase the success rate of exploration.

Key words: geothermal exploration; CSAMT; temperature test for shallow hole; Sankeng geothermal field; Guangdong Province