

东南沿海厦门湾-漳州盆地地热地质特征 及干热岩勘查方向

蔺文静^{1,2)}, 陈向阳³⁾, 甘浩男^{1,2)}, 岳高凡^{1,2)}

1) 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄, 050061; 2) 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 石家庄, 050061; 3) 福建省闽南地质大队, 福建漳州, 363000

内容提要:东南沿海位于欧亚板块与菲律宾板块的俯冲带, 构造运动活跃, 同时, 该区也是我国最主要的高放射性花岗岩分布区, 发育大面积的中生代酸性花岗岩体, 具有良好的干热岩赋存背景。本文以东南沿海福建厦门湾-漳州盆地为例, 在区域地热地质背景研究的基础上, 从区域大地热流、地温梯度、热储温度、循环深度以及深部地温场分布等方面系统分析了厦门湾-漳州地区干热岩资源的形成条件, 科学评价了本区未来干热岩资源勘查的适宜深度。分析认为, 区内平均地温梯度约为 $18.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 低于大陆地区平均值; 花岗岩体的放射性生热率仅略高于世界范围内的花岗岩放射性生热率的平均值; 区内相对高的地表热流值很大一部分来自于地幔热传导, 放射性元素生热贡献相对较低, 要达到 180°C 的干热岩开发温度, 勘查深度要超过 6 km ; 区内未来干热岩资源的开发应充分考虑深部热源条件、地表盖层厚度以及区域断裂对钻探工程的影响, 这些认识对于本区未来干热岩资源勘查开发工作有一定的指导意义。

关键词: 热储温度; 干热岩; 赋存条件; 适宜深度; 厦门湾-漳州盆地

干热岩(hot dry rock-HDR)是地热资源的重要赋存形式之一, 指地层深处(一般指地下 $3\sim 10\text{ km}$)存在的没有水或蒸汽的致密的热岩体。干热岩分布广泛, 是未来地热开发的主要方向。据 MIT(2006)报告, 只要开发美国 $3500\sim 7500\text{ m}$ 深度 2% 的干热岩资源储量, 就将达到 260000 EJ , 是美国 2005 年全年能源消耗总量的 2600 倍, 有极大的开发潜力。据初步估算, 我国大陆 $3\sim 10\text{ km}$ 深处干热岩资源总计为 $2.5\times 10^{25}\text{ J}$, 相当于 860 万亿吨标煤, 若能采出 2% , 即相当于中国 2010 年全国一次性能耗总量的 5300 倍(Lin Wenjing et al., 2012, 2013)。

干热岩地热发电与核能、太阳能或其他可再生能源发电相比, 尽管目前技术尚未成熟, 但作为重要的潜在能源, 已具备了一定的商业价值(Lu Chuan et al., 2015; Xu Tianfu et al., 2018)。我国干热岩地热开发研究虽然起步稍晚, 但近年来也取得了丰

硕的成果。Gan Haonan et al. (2015)、Wang Guiling et al. (2016)以及 Lu Chuan et al. (2017)通过对国内外已发现干热岩资源进行综合分析, 结合中国地质构造背景, 将中国干热岩资源分为高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型和强烈构造活动带型等四种成因类型, 并提出了不同类型干热岩资源的成因机制及有利前景区。Xu Tianfu et al. (2016)通过分析美国干热岩开发过程中具有重大意义和成果的几个经典工程实例, 结合我国干热岩资源的赋存条件、开发利用背景以及当前的技术装备条件, 指出了未来研究的重点领域, 并给出了重要意见。我国青海共和盆地已发现品质较高的干热岩体(Yan Weide, 2015), 东南沿海也正在开展干热岩资源勘查研究工作(Lin Wenjing et al., 2016)。但到目前为止, 中国干热岩资源开发及其技术研究依旧十分薄弱, 特别是干热岩资源靶区选择、储层激发关

注: 本文为中国地质调查项目(编号 12120115045901/DD20160191)、国家自然科学基金项目(编号 41741018)和中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(编号 SK201902)联合资助成果。

收稿日期: 2020-04-30; 改回日期: 2020-05-26; 网络发表日期: 2020-05-30; 责任编辑: 邱楠生; 责任编辑: 周健。

作者简介: 蔺文静, 男, 1978 年生。博士, 高级工程师(教授级), 主要从事地下水、地热资源调查评价相关研究。Email: lwjing@msn.com。

引用本文: 蔺文静, 陈向阳, 甘浩男, 岳高凡. 2020. 东南沿海厦门湾-漳州盆地地热地质特征及干热岩勘查方向. 地质学报, 94(7): 2066~2077, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020223.

Lin Wenjing, Chen Xiangyang, Gan Haonan, Yue Gaofan. 2020. Geothermal, geological characteristics and exploration direction of hot dry rocks in the Xiamen bay-Zhangzhou basin, southeastern China. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2066~2077.

键技术和示范工程建立等方面,亟需缩小与发达国家间的差距,紧跟国际步伐(Wang Guiling et al., 2015),力求在不久的将来在利用研究领域中有我国的一席之地。

干热岩资源的开发绝大部分以开采地壳中生代以来中酸性侵入岩体中所蕴含的热量为主。东南沿海地区是我国最主要的高放射性花岗岩分布区,发育大面积的中生代酸性花岗岩体(Wang Dezi et al., 2002),花岗岩中富含 U、Th、K 等放射性元素,其放射性元素的衰变热是重要的热源,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 $100\mu\text{W}/\text{m}^2$ (Zhao Ping, 1995),在覆盖层理想的地方,可以获取理想的干热岩资源。本文以东南沿海福建厦门湾-漳州盆地为例,在区域地热地质背景研究的基础上,从区域大地热流、地温梯度、热储温度、循环深度以及深部地温场分布等方面系统分析了海西厦门湾—漳州地区干热岩资源的形成条件,科学评价了本区未来干热岩资源勘查的适宜深度,建立了本区干热岩赋存的概念模型,对于本区未来干热岩资源勘查开发工作有一定的指导意义。

1 区域地质背景

研究区位于华南板块华夏地块东缘,由于古太平洋板块的俯冲造成燕山期大规模的岩浆活动,广泛发育晚侏罗世和早白垩世花岗岩体。印支运动后期,由于古太平洋板块的俯冲活动造成的挤压抬升,使福建由浅海隆生为陆地。约在晚三叠世,板片前缘到达福建块体的西部下方,深度达 100 km 以上,造成小规模火山喷发和侵入活动,在俯冲板片表面生成岩浆。随着俯冲继续,俯冲倾角不断变大,俯冲板片上方的空间,由于软流圈物质的涌入和生成岩浆上升形成涡流,成为部分熔融状态的“楔形区”,带给上覆板片以大量的地幔热流。大约在 160 Ma 前,板块俯冲倾角接近 30° ,此时库拉-太平洋双扩张

脊的快速扩张造成板块快速俯冲,并伴有强烈的侵蚀作用,古海沟向陆侧迁移,大量岩浆迅速生成,造成了福建东部晚侏罗世大规模的火山侵入活动,同时地幔楔形区涡流大大加剧,福建中西部在部分岩浆和强大的地幔热流作用下,出现了较大规模的中、上部地壳重熔岩浆的侵入活动,局部形成火山喷发。此后,由于台湾以东洋壳上燕山期末—喜马拉雅期俯冲带的形成,福建沿海俯冲带的活动趋于停止,岩浆活动规模明显降低(Wan Tianfeng et al., 1987; Liao Zhijie, 2012)。

由于古俯冲板片插入联合陆块之下而形成了双层岩石圈结构,从而造成东部软流圈的深凹陷,但存在局部软流圈隆起。另外,由于板块的俯冲作用,对莫霍面的深度变化造成了一定的影响。工作区邻近古海沟,陆侧板片的相对仰冲,造成陆壳块段抬升而遭受强烈剥蚀,它使得陆壳向海沟逐渐减薄形成地幔坡,从内陆到沿海莫霍面深度迅速变浅。

2 干热岩资源形成条件分析

2.1 深孔测温及地温梯度

地热异常区的热量可以通过热的传导作用不断地向地表扩散,通过深孔测温可以获得地表以下一定深度的地层稳定温度,圈定出地热异常区。Xiong Liangping et al. (1990)曾在漳州盆地内开展过大量的深孔测温工作,取得了大量的第一手数据。近年来,在漳州盆地的外围非地热异常区又陆续施工了多个千米钻孔,均获得了较高质量的测温数据,其典型钻孔的详细信息及测温剖面见图 1、表 1。根据测温数据,钻孔温度与深度之间呈现较好的线性规律,温度随深度增加而增加,地温梯度值波动不大,呈现出传导型增温特点。

地温梯度采用最小二乘法求取,线性回归方程式为:

$$T(Z) = T_0 + GZ$$

表 1 福建漳州地区典型钻孔热流计算段内地温梯度计算结果						
Table 1 Temperature gradient in borehole for heat flow calculation section in Zhangzhou area						
钻孔编号	钻孔位置	经纬度	钻孔深度(m)	热流计算段(m)	线性回归方程式及相关系数 R^2	地温梯度 $G(^\circ\text{C}/\text{km})$
BT1	隆教新华都白塘湾	118. 0390°E 24. 2292°N	2000. 37	100. 00~1850. 00	$y=0. 01976x+24. 19$ $R^2=0. 99776$	19. 8
HD1	东泗清泉林场	117. 7354°E 24. 36803°N	4002. 96	499. 00~3997. 00	$y=0. 02175x+18. 81$ $R^2=0. 994724$	21. 8
DK1	东山樟塘	117. 4717°E 23. 7201°N	2014. 30	200. 00~1950. 00	$y=0. 01998x+20. 06$ $R^2=0. 99647$	20. 0
JL1	惠安聚龙小镇	118. 7119°E 25. 0577°N	1150. 00	750. 00~1150. 00	$y=0. 01843x+21. 14$ $R^2=0. 99872$	18. 4

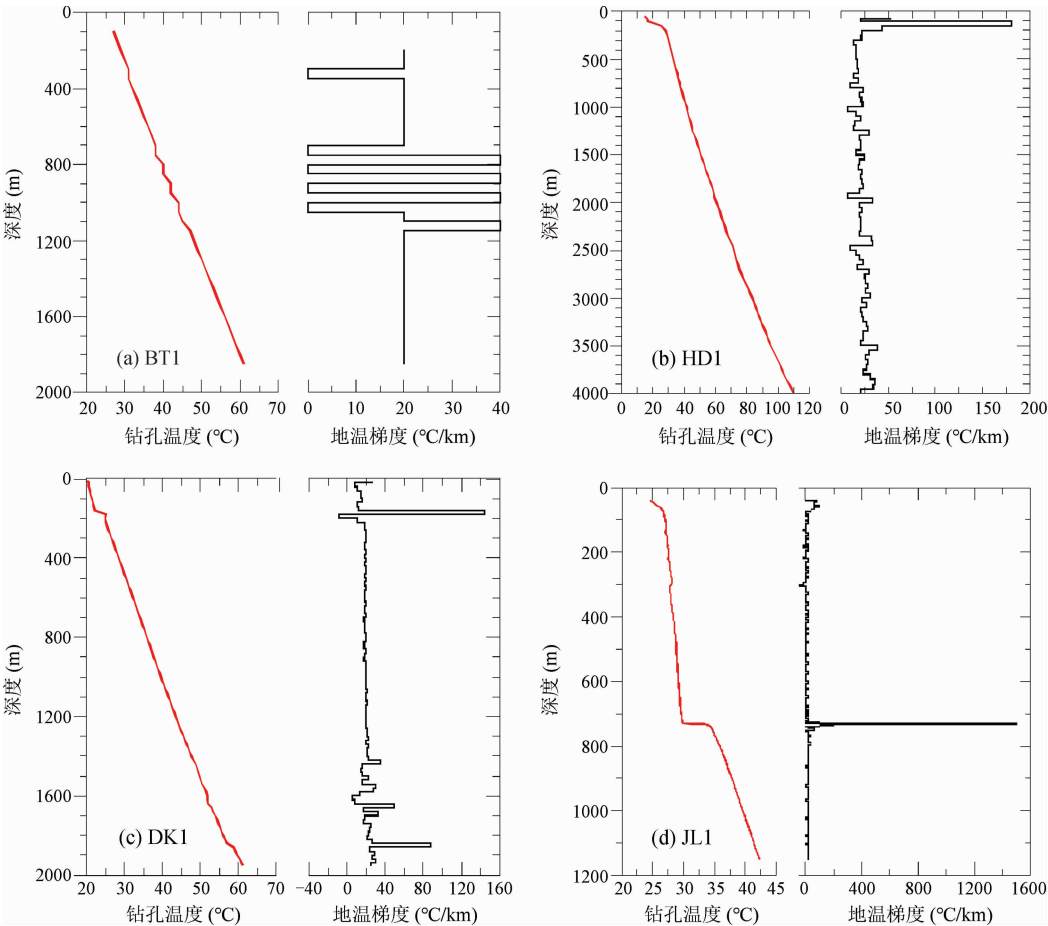


图 1 福建漳州地区典型深孔温度-深度、地温梯度-深度图

Fig. 1 Temperature-depth and geothermal gradient-depth of deep holes in Xiamen bay and Zhangzhou basin

式中, T_0 当无其他因素干扰时, T_0 等于恒温带的温度($^{\circ}\text{C}$); G 即为热流计算段内的地温梯度($^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 上述钻孔热流计算段内的线性回归方程式、地温梯度和恒温带取值见表 1。结果显示, 漳州盆地外围非地热异常区所测钻孔的地温梯度变化幅度不大($18.4\sim21.8^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 平均地温梯度约为 $18.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 低于大陆地区平均值($25\sim30^{\circ}\text{C}/\text{km}$), 且远低于漳州盆地内钻孔实际地温梯度($>37^{\circ}\text{C}/\text{km}$) (Xiong Liangping et al., 1990)。

2.2 放射性生热率

漳州复式岩体是漳州地表岩石出露的主体, 单个岩体之间由晚中生代火山岩或第四纪沉积物所覆盖。Zhao Ping et al. (1995) 对区内不同时代不同岩性的岩石生热率进行过系统的分析, 得出区内中、新生代火山岩覆盖区岩石生热率介于 $2.1\sim2.8\mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间, 最高可达到 $4.1\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。为了更好地描述漳州地区深部岩体的放射性生热率随深度分布情况, 通过对区内地表出露的花岗岩样品及三个深孔中的岩芯进行了连续取样并开展了放射性元素含量

测量工作(表 2)。其中, 地表露头花岗岩样品, 放射性生热率的变化范围为 $1.30\sim7.00\mu\text{W}/\text{m}^3$, 集中在 $2.00\sim6.00\mu\text{W}/\text{m}^3$ 范围内, 平均值 $3.65\mu\text{W}/\text{m}^3$; 钻孔中花岗岩样品放射性生热率值相对均匀, 变化较小, 集中在 $1.67\sim5.16\mu\text{W}/\text{m}^3$, 略高于世界范围内的花岗岩放射性生热率的平均值, 但无论是最高值还是平均值, 研究区花岗岩的放射性生热率都要低于粤北-赣南花岗岩体(Lin Lefu et al., 2017), 还不能称之为高产热花岗岩(HHP)。

2.3 区域大地热流

东南沿海是我国重要的水热活动区, 前人在区内开展了长期的、系统的大地热流测试及研究工作, 取得了一大批热流数据及地球物理研究成果(Wang Jiyang et al., 1988, 1990a; Hu Shengbiao et al., 2001; Jiang Guangzheng et al., 2016), 为研究海西地区热流值的特征提供了必要的条件。本文在收集以往相关实测大地热流结果的基础上, 开展了研究区内近年来有关深孔的大地热流测量工作, 共获取大地热流数据 7 个, 结果如表 3 所示。

表 2 福建漳州地区典型钻孔放射性生热率实测值

Table 2 Measured values of radioactive heat generation rate in typical boreholes of Zhangzhou area					
序号	钻孔位置	地理坐标	岩性描述	变化范围($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	平均值($\mu\text{W}/\text{m}^3$)
1	漳州市立人学校	N:24°32′9.92″, E:117°38′33.93″	以钾长石花岗岩为主,钻孔浅层样品风化严重,有的已经泥化	2.04~5.16	3.92
2	漳州市芝山公园	N:24°31′28.2″, E:117°38′22.21″	中粗粒花岗岩,有钾长石斑晶,少量黑云母	3.15~4.99	4.00
3	漳州市隆教乡	N:24°15′53.9″, E:118°04′51.4″	中细粒花岗岩为主,见钾长石斑晶	1.67~3.76	2.52
4	地表露头		花岗岩样品	1.30~7.00	3.65

表 3 福建省实测大地热流值一览表

Table 3 Measured heat flow values in Fujian Province							
序	位置	孔口标高(m)	深度范围(m)	地温梯度($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	热导率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	热流值(mW/m^2)	质量类别
1	福建厦门	75	40~170	12.5±0.9	3.63	47.1	B
2	福建南靖	—	200~270	40.7±2.70	2.68±0.1	107.5	D
3	福建漳州	18	100~500	85.0±26	2.46±0.23	209	D
4	龙海隆教*	20	200~760	17	3.18	54.1	B
5	龙海白塘	30	100~1850	19.8	3.18	63.0	A
6	龙海东泗*	50	500~3350	21.8	3.01	65.3	B
7	东山樟塘	10	200~1950	20	2.95	58.89	A

以数据质量高的 A、B 类数据统计研究区热流平均值为 57.67 mW/m², 低于中国大陆大地热流平均值 60.4 mW/m² 和全球大陆地区大地热流平均值 65 mW/m²。结合福建省其他热流数据可以得出, 本次获取的大地热流及其空间分布与前人所得出的热流分布趋势基本一致, 在研究区东部沿海存在一条较为窄长的热流低值区, (50~60 mW/m²) 干热岩的勘察应回避这一区域; 稍入内陆的漳州、福州—德化一带是高热流值区 (80~90 mW/m²), 则是干热岩勘察的有利背景。

2.4 热储温度及估算

深部温度估算是干热岩资源勘查与选区最重要的课题, 在缺乏深孔测温资料的前提下, 可以借助水文地球化学手段, 根据研究区出露的天然温泉特征来估算其深部热储温度及深度, 从而获得区内深部温度场的大致分布范围, 为干热岩勘查靶区选址提供参考依据。Pang Zhonghe et al. (1990)、Wang Jiyang et al. (1990b) 利用 SiO₂ 混合模型对漳州地热田热储温度及热水循环深度进行了估算, 得出漳州地热田热储温度为 140℃, 循环深度为 3.5km 和 4.0km。为全面反映研究区内深部地温场及其分布, 本次工作对区内所有出露的天然温泉及近年来施工的地热井进行了样品采集。研究区内现出露温泉 18 处, 大部分为天然出露, 流体水温 36.8~105℃ 不等。本次研究共采集样品 31 件, 其中温泉水样 17 件, 地热井水样 1 件, 山区冷泉水样 9 件, 第四系浅层地下冷水 3 件, 雨水样 1 件。样品均在现

场过滤并收集于 250 mL 耐高温取样瓶中, 采样前取样瓶用待取水样润洗三次。各个采样点采集水样 3 瓶, 一瓶加入优级纯 HNO₃ 至 pH 低于 1 用于阳离子分析, 一瓶未经处理用于阴离子及 D、¹⁸O 同位素分析, 一瓶备用。采集后的样品运回实验室保存于 4℃ 冷藏箱, 并于一周之内测试。不稳定的水化学参数, 如水样温度 (T)、pH、电导率 (EC)、总溶解性固体 (TDS) 和氧化还原电位 (Eh) 用经过校正后的便携式多参数测定仪在现场测定。阴阳离子测试分析在中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试分析中心完成, 温泉、地热井样品及代表性冷泉的主要水化学组分见表 4。

2.4.1 水-岩平衡判断

采用地球化学温标法对不同温泉的热储温度进行估算。地热温标的使用有一个基本前提, 即作为地热温标的某种溶质或气体和热储中的矿物达到了平衡状态, 所以必须认真研究热水和矿物的平衡状态, 选取可靠的地热温标。将研究区各类水体中的 Na、K、Mg 含量经线性转换后投至 Na-K-Mg 平衡三角图上 (图 2), 其中, 所有的浅层地下水、冷泉均位于镁离子右下角顶点处的未成熟水区域, 说明其尚处于水-岩作用的初级阶段; 而所有采自温泉及地热井的样品均位于部分平衡或混合水区域, 反映了水-岩之间尚未达到离子平衡状态, 溶解作用仍在进行, 或热水受到了冷水的混合。另外, 从 Na-K-Mg 平衡三角图上可以看出, 大多数温泉点的热储温度均落在 120~200℃, 汤岸温泉的热储温度均落在

表 4 厦门湾-漳州盆地主要取样点及水化学成分一览表(mg/L)

Table 4 List of main sampling points and hydrochemical composition (mg/L) in Xiamen bay and Zhangzhou basin																	
序号	取样点	温度 (℃)	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻	Br ⁻	I ⁻	偏硅酸	溶解性 总固体	pH 值
1	黄坑(温泉)	58	39.35	689.0	207.5	2.84	1216	178.2	139.0	0.00	0.80	5.20	3.35	<0.020	151.3	2529	7.11
2	汤兜(温泉)	55.6	3.29	137.6	4.04	0.04	29.88	78.34	154.1	17.83	<0.20	17.50	<0.10	<0.020	99.84	442.6	8.90
3	新塘(温泉)	47.5	3.98	185.0	24.22	0.08	135.3	159.4	90.67	0.00	<0.20	11.00	0.27	<0.020	82.94	629.8	7.67
4	汤坑(温泉)	70.5	3.05	142.0	4.73	0.04	29.88	130.0	114.8	11.89	0.20	17.00	<0.10	<0.020	95.42	470.2	8.82
5	下庄(温泉)	65.1	51.14	1737	1332	7.82	4868	241.9	30.22	0.00	3.25	2.50	14.00	0.11	98.28	8349	6.82
6	松岭(温泉)	77.4	65.84	1746	1258	11.58	4745	267.1	48.35	0.00	3.36	2.90	14.00	0.13	133.3	8241	6.94
7	金谷(温泉)	64.5	75.06	2276	1846	9.48	6415	307.4	42.31	0.00	4.68	2.40	18.70	0.10	120.9	11069	6.91
8	港尾汤头(温泉)	62.7	36.45	1289	399.1	1.26	2566	71.57	33.24	0.00	2.36	5.00	8.00	0.05	105.82	4477	6.97
9	盘谷(温泉)	36.5	1.69	91.57	7.22	0.13	12.30	67.68	126.9	0.00	0.34	11.00	<0.10	<0.020	67.73	308.3	7.89
10	雪美(温泉)	45.8	2.57	115.0	11.94	<0.013	12.30	151.4	76.16	11.89	<0.20	11.00	<0.10	<0.020	92.82	425.9	8.95
11	田里(温泉)	50.5	45.82	1350	985.0	4.50	3691	213.3	72.53	0.00	2.68	2.50	12.00	0.08	115.1	6432	7.07
12	汤岸(温泉)	74.4	44.06	945.6	537.4	2.19	2249	220.0	36.87	0.00	1.52	3.40	7.50	0.05	132.0	4132	7.01
13	宝丰(温泉)	68.6	4.33	125.6	5.86	0.10	19.33	80.75	151.1	11.89	<0.20	18.50	<0.10	<0.020	127.4	440.3	8.86
14	天竺山(冷水泉)	19.7	2.14	2.38	1.56	0.23	3.51	2.63	12.09	0.00	0.88	<0.10	<0.10	<0.020	19.50	34.37	6.79
15	箕筲湖(温泉)	41	79.50	4018	2882	163.6	10720	662.1	47.75	0.00	8.08	1.90	36.20	0.16	86.58	18665	6.64
16	五缘湾(温泉)	56	130.7	4572	2022	117.0	10544	467.5	78.58	0.00	7.92	1.90	34.00	0.15	104.0	18022	7.08
17	杏林湾(温泉)	72	91.12	1607	1029	5.77	4306	147.9	105.8	0.00	5.00	2.00	14.30	0.17	142.5	7372	7.07
18	厦门东山(温泉)	71	204.3	4916	2943	56.60	12214	347.0	48.35	0.00	9.20	2.40	40.00	<0.020	118.3	20851	6.81
19	东泗雨水	无	0.85	0.99	2.39	0.16	4.57	3.82	3.02	0.00	7.76	0.12	<0.10	<0.020	1.20	23.33	5.82
20	佰翔圆山(热水井)	73	89.94	1598	1024	5.64	4306	148.0	105.8	0.00	5.00	2.00	14.30	0.17	142.2	7357	7.07
21	天宝北山(冷水泉)	24.3	1.79	7.67	11.45	3.34	5.98	3.62	48.35	0.00	14.76	0.10	<0.10	<0.020	39.26	103.1	6.92

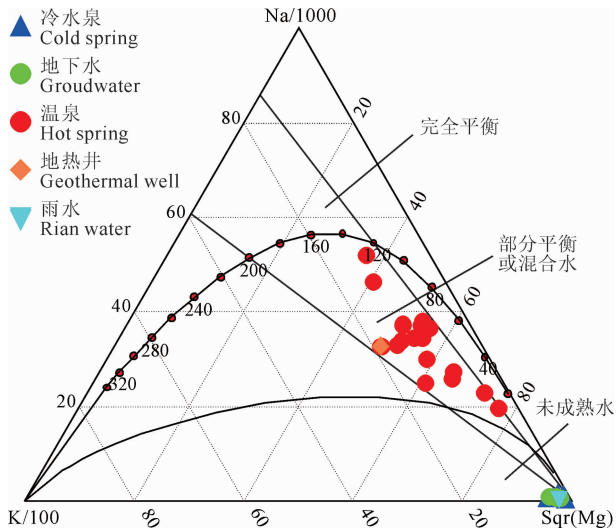


图 2 厦门湾-漳州盆地各类水体 Na-K-Mg 图解
Fig. 2 Na-K-Mg triangular diagrams of various water samples in Xiamen bay and Zhangzhou basin

160~180℃,黄坑温泉、杏林湾温泉、佰翔圆山地热井热水的热储温度均落在 180~200℃。总体来说,阳离子温标不适合研究区的大部分水样,利用其进行计算不会得出合理的平衡温度值,但对于部分平衡区域和平衡线上的样品有一定的参考价值。

从图 3a 中可看出研究区地下热水样点多数落在玉髓理论平衡溶解线上方,方石英平衡溶解线附近,表明样品中石英和玉髓处于饱和或过饱和状态;

同时从图 3b 中发现,研究区内样点大部分落在 Na/K 平衡线的下方,只有汤坑温泉所取的水样位于 Na/K (Fournier,1973)平衡线和 Na/K (Fournier,1979)平衡线之间(Fournier and Truesdell,1973; Fournier,1979),表明大部分水样可能受到冷水混合的影响,水-岩作用未达到完全平衡。

综合 Na-K-Mg 三角图和 log (Na/K)-1000/T 图,初步判断研究区大部分样品受混合作用影响较大,不适宜使用阳离子地球化学温标,但具有一定的参考价值。同时一些学者提出,冷、热水混合过程对 Na/K 值影响甚微,利用 Na/K 地球化学温标能反映深部热水的温度。而对于位于 Na/K 平衡线之上的汤坑温泉样品可以尝试使用 Na-K-Ca 温标。根据 log(SiO₂)-1000/T 图解,初步判断研究区样品可以使用 SiO₂ (石英或玉髓)地球化学温标,SiO₂ 地球化学温标通常可以较好地反映混合作用发生后的热储。

研究区各温泉点的 SiO₂ 地球化学温标计算结果见表 5。

2.4.2 多矿物平衡图解法

Reed and Spycher(1984)提出多矿物平衡图解法,用以判断地热系统中热液与矿物之间总体的化学平衡状态。其原理是将水中多种矿物的溶解状态当成温度的函数,若一组矿物在某一特定温度下同时接近平衡,则可判断热水与这组矿物达到了平衡,

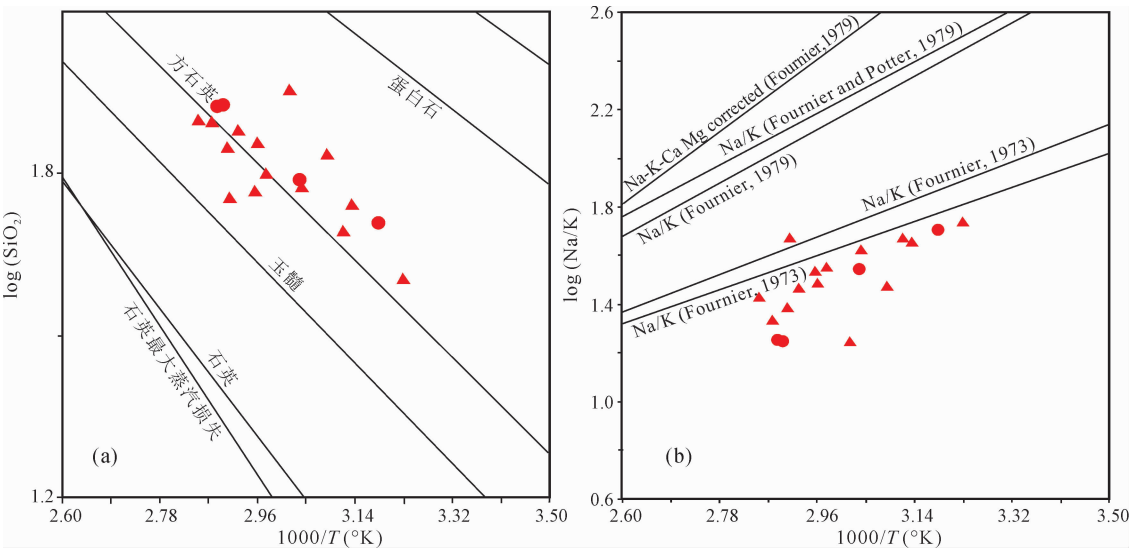


图 3 厦门湾-漳州盆地地下热水 SiO₂ (a)、Na/K (b)与 1000/T 关系图解

Fig. 3 Diagram of SiO₂ (a), Na/K (b) and 1000/T for hot water in Xiamen bay and Zhangzhou basin

表 5 厦门湾-漳州盆地各温泉水点 SiO₂ 地球化学温标

Table 5 SiO₂ geochemistry temperature of the hot spring in Xiamen bay and Zhangzhou basin

序号	取样位置	取样 温度(℃)	玉髓-无蒸汽 损失(℃)	玉髓-最大蒸汽 损失(℃)	石英-无蒸汽 损失(℃)	石英-最大蒸汽 损失(℃)	循环 深度(m)
1	黄坑温泉	58	123.8	119.4	149.1	142.7	5154
2	汤兜温泉	55.6	98.0	98.6	125.9	123.1	4225
3	新塘温泉	47.5	87.6	90.0	116.3	115.0	3842
4	汤坑温泉	70.5	95.4	96.4	123.5	121.1	4130
5	下庄温泉	65.1	97.1	97.8	125.0	122.4	4192
6	松岭温泉	77.4	115.5	112.8	141.7	136.5	4860
7	金谷温泉	64.5	109.4	107.9	136.2	131.9	4640
8	港尾汤头温泉	62.7	101.4	101.3	129.0	125.8	4349
9	盘古温泉	36.5	76.8	81.0	106.4	106.5	3445
10	雪美温泉	45.8	93.8	95.1	122.1	119.9	4072
11	田里温泉	50.5	106.4	105.4	133.5	129.6	4531
12	汤岸温泉	74.4	114.9	112.3	141.2	136.1	4837
13	宝丰温泉	68.6	112.7	110.5	139.2	134.4	4757
14	箕筲湖温泉	41	89.9	91.9	118.5	116.9	3929
15	五缘湾温泉	56	100.4	100.5	128.0	125.0	4312
16	杏林湾温泉	72	119.8	116.2	145.6	139.8	5014
17	东山温泉	71	108.1	106.8	135.0	130.9	4592
18	佰翔圆山温泉	73	119.7	116.1	145.5	139.7	5009

平衡时温度即为深部热储温度。混合水和那些水热矿物达不到平衡的热水都不可能在某一温度下同时使多种矿物达到平衡,据此可判断热水是否与浅部冷水发生了混合、热水是否与某个矿物组合处于平衡状态,以及平衡所对应的温度等。

本文通过用微斜长石固定 Al 来分析研究区热水的平衡状态(Pang and Reed,1998)。根据研究区热水水化学数据,利用 PHREEQCI 程序计算各矿物在不同温度(T)的饱和指数(SI),以温度为横坐标,log(Q/K)值为纵坐标,绘制表示矿物—溶液平

衡状态的 SI-T 曲线图。根据研究区岩石矿物调查资料,我们选取了常见的 11 种矿物,萤石(Fluorite)、钠长石(Albite)、云母(Muscovite)、重晶石(Barite)、玉髓(Chalcedony)、石英(Quartz)、高岭石(Kaolinite)、伊利石(Illite)、硬石膏(Anhydrite)、Mg-贝得石(Beidellite-Mg)、Na-贝得石(Beidellite-Na),做出其 SI-T 曲线图(图 4、5)。

对研究区所有水样做 SI-T 曲线图,主要分为两种类型:① 收敛性较好,除部分样品高岭石、贝得石-Mg,贝得石-Na 未饱和外,大多矿物均与 SI=0

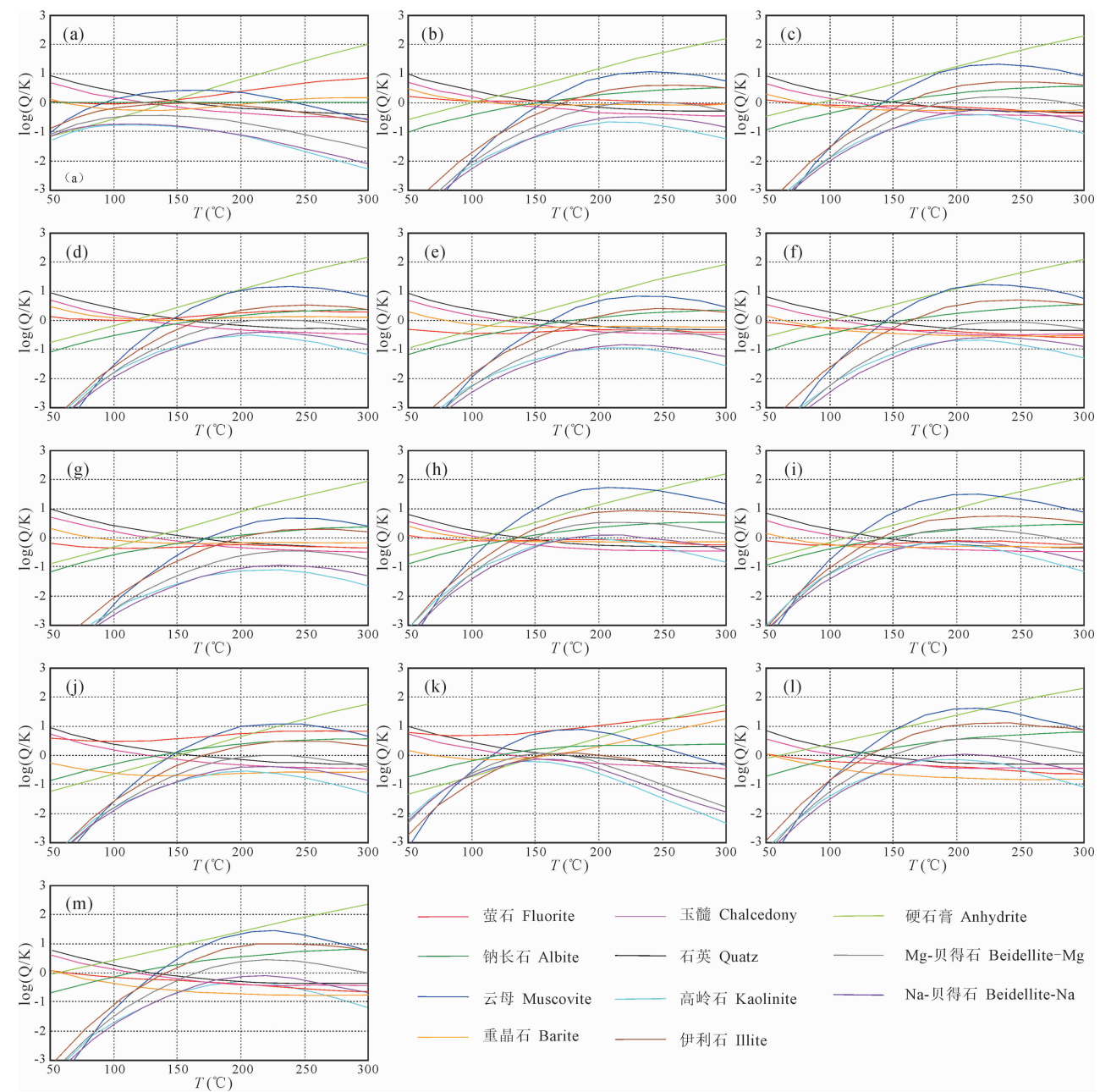


图 4 厦门湾-漳州盆地典型温泉水样 $\log(Q/K)$ - T 图解(收敛较好,与 $SI=0$ 与一个交点)

Fig. 4 $\log(Q/K)$ - T diagram of typical hot springs in Xiamen bay and Zhangzhou basin (one point of intersection with $SI=0$)

(a) — 黄坑温泉; (b) — 松岭温泉; (c) — 金谷温泉; (d) — 汤岸温泉; (e) — 杏林湾温泉; (f) — 东山温泉; (g) — 佰翔圆山温泉;
(h) — 下庄温泉; (i) — 田里温泉; (j) — 港尾汤头温泉; (k) — 新塘温泉; (l) — 笕筲湖温泉; (m) — 宝丰温泉

(a) — Huangkeng hot spring; (b) — Songling hot spring; (c) — Jingu hot spring; (d) — Tangan hot spring; (e) — Xinlinwan hot spring; (f) — Dongshan hot spring; (g) — Yuanshan hot spring; (h) — Xia Zhuang hot spring; (i) — Tianli hot spring; (j) — Tangtou hot spring; (k) — Xintang hot spring; (l) — Yuandanhu hot spring; (m) — Baofeng hot spring

相交,其中,除黄坑温泉、杏林湾温泉、佰翔圆山温泉以及汤岸温泉收敛温度较高外,其余均收敛于 130~160℃之间,与 Na-K-Mg 平衡三角图所反映的热储温度范围一致(图 4)。② 收敛性相对较差,多数矿物与 $SI=0$ 相交且有两个交点,第一个交点温度范围 120~150℃,与 Na-K-Mg 平衡三角图反映的

一致;第二个交点位于 180~250℃,说明可能存在深部热储,存在二元热储构造(图 5)。

综合研究区各温泉水岩平衡判断、 SiO_2 温标、多矿物平衡图解, SiO_2 石英-无蒸汽损失温标与多矿物平衡图解结果最为接近,因此,我们选择石英-无蒸汽损失温标计算结果作为研究区温泉的热储温度。

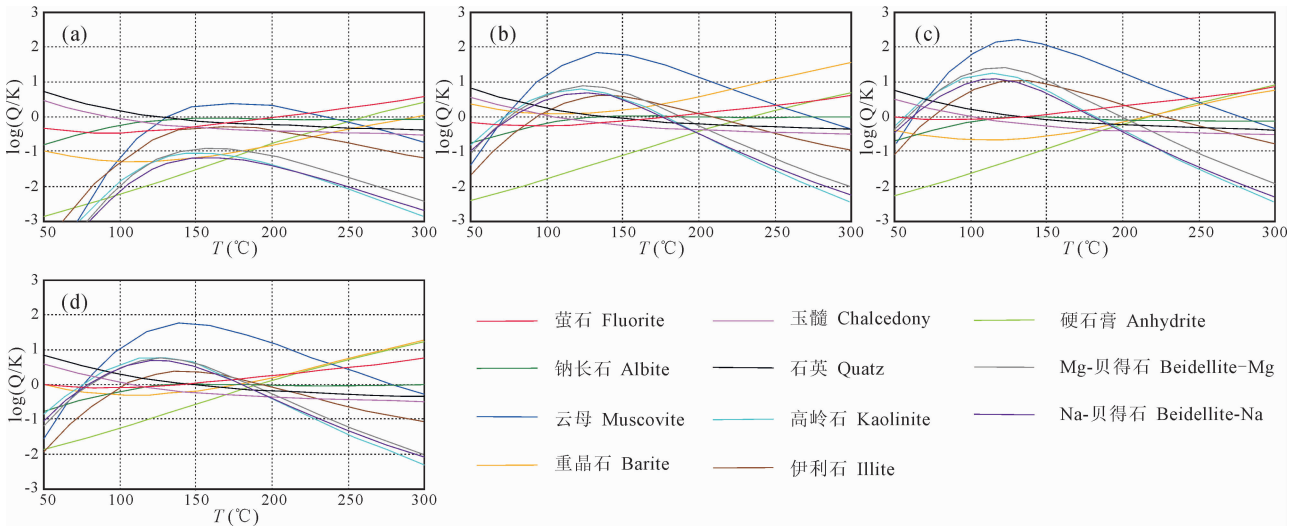


图 5 厦门湾-漳州盆地典型温泉水样 $\log(Q/K)-T$ 图解(收敛相对较差,与 $SI=0$ 有两个交点)

Fig. 5 $\log(Q/K)-T$ diagram of typical hot springs in Xiamen bay and Zhangzhou basin (two points of intersection with $SI=0$)

(a)—汤兜温泉; (b)—汤坑温泉; (c)—盘古温泉; (d)—雪美温泉

(a)—Tangdou hot spring; (b)—Tangkeng hot spring; (c)—Pangu hot spring; (d)—Xuemei hot spring

2.5 热储循环深度

地下热水往往是当其在深循环过程中受到深部热源的加热而增温。可通过下式大致推断循环深度。

$$H = (T - T_0) / k + H_0 \tag{3}$$

式中, T 为热储温度($^{\circ}\text{C}$), T_0 为当地多年平均气温($^{\circ}\text{C}$), k 为地温梯度($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$), H_0 为常温带厚度(m)。

参考研究区深孔实测地温梯度,取其平均值为 $2.5^{\circ}\text{C}/100\text{m}$,其中 T_0 取 21°C , H_0 为 30m ,计算各取样点热储深度见表 5。

3 深部地温场模拟及预测

从本项目研究的目的出发,对岩石圈热状态的估测我们设定在岩石圈的上部,即地表下 10 km 的范围。

3.1 估算模型

本文采用一维(垂向)稳态模型进行估算。即只考虑温度在垂向上的传导而忽略对流的影响,基于热传导方程:

$$\frac{d}{dz} \left\{ K(T) \frac{dT(z)}{dz} \right\} + A(z) = 0 \tag{4}$$

式中热导率 $K(T)$ 是温度 T 的函数,放射性生热率 $A(z)$ 是深度的函数。相应的边界($z=0$)条件为:

$$\begin{aligned} T(0) &= T_0 \\ \left[\frac{dT}{dz} \right]_0 &= \frac{q_0}{K_0} \end{aligned} \tag{5}$$

式中, T_0 为地表年平均温度($^{\circ}\text{C}$), K_0 为现今地表样品实验室条件下的实测热导率值($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), q_0 为地表热流(mW/m^2)。在此边界条件下,视地壳生热率和热导率随深度分布形式的不同,一维稳态热传导方程可以有下面不同的分析解:

如果 $A(z)$ 呈指数形式,即 $A(z) = A_0 \exp(-z/D)$, D 为生热率随深度的衰减因子(即地壳生热率衰减至地表生热率 $1/e$ ($e = 2.71828$) 时的深度), K 为常数,那么,其分析解为:

$$T(Z) = T_0 + q_0 Z / K + A_0 D Z \exp(-Z/D) / (K + A_0 D^2 (1 - \exp(-Z/D)) / K) \tag{6}$$

如果将热导率 K 视为常量, $A(z)$ 随深度保持恒定或分段常数,则其分析解为:

$$T(Z) = T_0 + q_0 Z / K - A_0 Z^2 / 2K \tag{7}$$

式中, $T(Z)$ 为 $Z(\text{km})$ 深度下的岩石圈温度($^{\circ}\text{C}$); T_0 为地表附近恒温层温度($^{\circ}\text{C}$),取 21°C ; q_0 为地表热流值(mW/m^2); D 为放射性元素在地壳浅层富集厚度,其经验值在 $7.5 \sim 10\text{ km}$,根据经验取上限 10 km ; A_0 为地表岩石生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$); K 为岩石热导率均值($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。

3.2 参数选取及模型的校验

利用近年来福建东部沿海地区陆续施工的一些超千米钻孔的测温数据,对一维稳态模型的两个公式分别按实测的参数进行了计算,考察模型的适用性,其参数的选取为:

地表岩石生热率 A : 根据区内花岗岩不同的锕、

钍、铀的含量计算平均生热率取 $3.943\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

岩石热导率 K : 根据收集到的区内相关测试数据, 统计得研究区岩石热导率平均值为 $3.109\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

模型校验结果见表 6。式(6)估算的温度与实际测温多为正偏离, 偏离幅度离散性较大, 从 $18.9\%\sim 53.81\%$, 这与公式将岩石生热率设定为随指数衰减(实测岩石生热率未发现有此趋势)及 D 值的取值有关。式(7)估算的温度与实际测温较为接近, 多为负偏离, 偏离离散性较小, 偏离的中值约在 -6% 左右。这是因为式(7)其物理意义上将放射

性生热率对地温的贡献只计算了其中的二分之一所致。

综上, 本文选取式(7)进行研究区地壳浅层热状态的分析估算。在垂向上, 地壳浅部的温度 $T(z)$ 与参数的选取有关, 其中, 与 q 、 A 成正比, 与 K 成反比。若地表温度取 21°C , 热流的取值分别从 $50\sim 90\text{mW}/\text{m}^2$; 生热率按平均值 $3.943\mu\text{W}/\text{m}^3$ 和模型验证的实测平均值的最小值 $2.52\mu\text{W}/\text{m}^3$ 为上下限, 花岗岩地区由于热导率差值不大, 取平均值 $3.109\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 根据以上参数条件分别计算出 $1\sim 10\text{km}$ 深度内 10 条可能的温度分布曲线(图 6)。

Table 6 Deviation of temperatures at bottom of boreholes and temperatures estimated by modelin Xiamen bay and Zhangzhou basin											
序号	钻孔名称	钻孔深度 (km)	大地热流值 (mW/m ²)	测井深度 (km)	测井深度 温度(℃)	热导率均值 K (W/(m·K))	生热率均值 A (μW/m ³)	式(6)估算温度		式(7)估算温度	
								T(Z)(℃)	偏离度(%)	T(Z)(℃)	偏离度(%)
1	DK1	2.014	58.9	1.95	61.2	2.949	2.52	88.8	45.20	58.3	-4.63
2	BT1	2	63.0	1.85	61.0	3.183	2.52	83.2	36.35	56.3	-7.75
3	HD1	2.587	65.28	2.587	81.9	3.001	2.97	119.6	46.03	74.0	-9.69
		4.003	65.3	3.35	94.8	3.001	2.97	145.8	53.71	88.3	-6.87
		4.003	65.3	3.999	108.7	3.001	2.97	167.1	53.81	100.1	-7.91
4	HX1	1.259	54.1	0.76	38.1	3.18	2.52	45.3	18.90	33.7	-11.57
5	JL1	1.15	61.6	1.15	42.3	3.078	2.32 *	59.9	41.69	43.5	2.88
6	DZK01	1.102	41.5	0.82	32.9	3.27 *	1.77 *	39.8	20.87	31.2	-5.07

注: 稳态测温条件(不排除有地下水活动干扰); 式(7)采用迭代法计算, 迭代层厚度为 1km; 参数加 * 为邻近钻孔测值。

由图 6 可以看出, 研究区东部地表下某点 2 km 温度可达 50°C 以上, 理论上, 只要深部的水文地质条件满足(合适的部位及深度), 可以取得具有开发利用价值的地热流体。而从干热岩开发的角度来看, 要达到 150°C 的干热岩试验开发温度, 其勘察深度至少要超过 5 km, 要达到 180°C 的干热岩开发温度, 则勘察深度要超过 6 km, 东泗施工的干热岩试验孔 4 km, 其孔底温度不超过 110°C 也能为该结论提供佐证。同时, 为避免浅部地下水径流的干扰, 钻孔位置宜选择远离断裂或取断裂的下盘布置为宜。

4 干热岩勘查方向

综合上述分析, 笔者认为东南沿海未来干热岩资源勘查需要考虑以下因素:

(1) 热源条件: 东南沿海深部热源来源直接关系到该地区是否存在高温岩体以及今后的地热资源开发, 这也是该地区地热研究中遇到的最具争议性的科学问题。目前, 尚无证据显示区内存在正熔融的岩浆囊作为附加热源。从区内花岗岩体的放射性生热率测试结果来看, 略高于世界范围内的花岗岩放射性生热率的平均值, 但还不能称之为高产热花岗

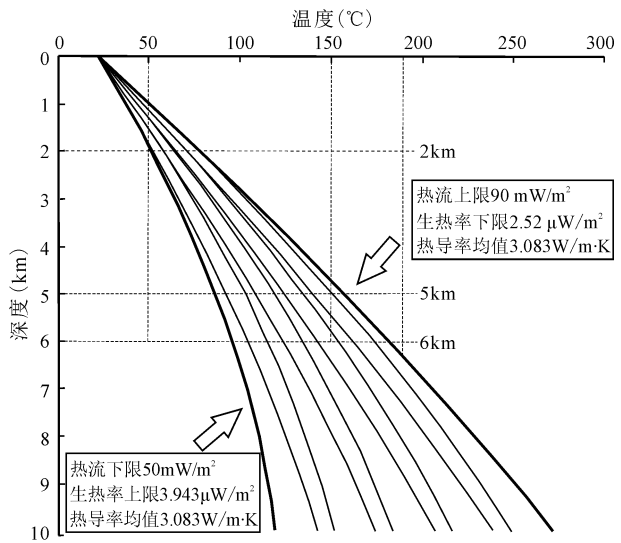


图 6 厦门湾-漳州盆地垂向温度估算结果
Fig. 6 Estimation of vertical temperature in Xiamen bay and Zhangzhou Basin

岩。这主要跟区内花岗岩以 I-A 复合型花岗岩为主有关, 其幔源物质贡献大, 不相容的放射性生热元素 U、Th 和 K 则相对含量较低。地表热流值作为各种热源(含地幔热、岩浆热、构造热、放射性元素衰变

热等)在地表的直接反应,其值大小在很大程度上反映了深部热源的综合情况。Hu Shengbiao et al. (1994)研究表明,闽粤沿海造山带地表平均热流仅为 49.9 mW/m^2 ,其地幔热流占到 26.9 mW/m^2 ;往内陆到闽西南前陆褶冲带,地表热流达到 $70.5 \sim 77.4 \text{ mW/m}^2$,其中地幔热流为 $35.4 \sim 41.6 \text{ mW/m}^2$ 。

(2)盖层条件:研究区内第四纪沉积岩主要为砂岩、粉砂岩、黏土岩以及一些风化物,普遍较薄,难以形成有效的保温盖层。值得一提的是,漳州地区发育有大量中生代火山岩,其85%以上为凝灰岩或熔结凝灰岩,火山岩夹层中偶见砂岩、砾岩、粉砂岩和玄武质安山岩,尤在平和县安厚镇一大溪镇灵通山(又称灵通岩)为最,厚度达1000 m以上。因此,凝灰岩的分布及其导热性能直接关系到基底花岗岩热量的保存。凝灰岩盖层与火山岩之间具有“同源异相”的关系,具有相对高的放射性生热率,这不仅有利于基底热量的保存,也有利于干热岩开发。

(3)构造条件:在板块交接部位,受板块俯冲影响,岩石圈的深部受到热侵蚀和减薄,岩石圈的高热状态促使岩石圈力学薄弱带发生构造活化(Zhang Jian et al., 2018)。东南沿海位于太平洋板块和欧亚板块的结合处,由于太平洋板块的俯冲,在岩石圈底部产生了不稳定的地幔热对流扰动,随着地幔热流向浅部岩石圈的传输,底辟的软流圈地幔逐渐冷却而形成新增生的岩石圈地幔,随着新增生岩石圈地幔的逐渐冷却,岩石圈发生张裂下陷(Fan Weiming et al., 1993),从而发育出许多反映深部构造活化的深大断裂,成为控制区域水热系统的重要通道。这些深大断裂的存在对于沟通深部热源、在地壳浅部局部地区形成高温岩体具有一定意义,但对于干热岩开发来说,则应尽量避免揭露该类断裂,以免在钻探过程中形成掉钻、堵塞等工程事故。

5 结论及建议

(1)东部福建沿海存在一条较为窄长的热流低值区($50 \sim 60 \text{ mW/m}^2$),干热岩的勘察应回避这一区域;稍入内陆的漳州一带是高热流值区($80 \sim 90 \text{ mW/m}^2$),高于中国大陆大地热流平均值 60.4 mW/m^2 和全球大陆地区大地热流平均值 65 mW/m^2 ,具有干热岩资源形成的有利条件。

(2)研究区地温梯度变化幅度大($12.7 \sim 21.8^\circ\text{C/km}$),平均地温梯度约为 18.3°C/km ,低于大陆地区平均值($25 \sim 30^\circ\text{C/km}$);区内花岗岩体的

放射性生热率略高于世界范围内的花岗岩放射性生热率的平均值;东南沿海相对高的地表热流值很大一部分热贡献来自于地幔,放射性元素生热贡献相对较低。

(3)综合研究区各温泉水岩平衡判断、 SiO_2 温标、多矿物平衡图解, SiO_2 石英-无蒸汽损失温标与多矿物平衡图解结果最为接近,根据 SiO_2 石英-无蒸汽损失温标计算所得的研究区温泉热储温度 $106 \sim 149^\circ\text{C}$,循环深度约 $3400 \sim 5100 \text{ m}$ 。

(4)深部地温场模拟显示,研究区要达到 150°C 的干热岩试验开发温度,其勘察深度至少要超过 5 km ;要达到 180°C 的干热岩开发温度,则勘察深度要超过 6 km ,同时,为避免浅部地下水径流的干扰,钻孔位置宜选择远离断裂或取断裂的下盘布置为宜。

(5)区内未来干热岩资源的开发应充分考虑深部热源条件、地表盖层厚度以及深大断裂对钻探工程的影响。

References

- Fan Weiming, Menzies M A, Yin Hanhui, Hao Xincui, Chen Xin, Zhou Heping. 1993. Nature and processes of the lower lithosphere of the Southeast China Coast. *Geotectonica et Metallogenia*, 17 (1): 23 ~ 30 (in Chinese with English abstract).
- Fournier R O. 1979. A revised equation for the Na-K geothermometer. *GRC Trans.*, 3: 221~224.
- Fournier R O, Truesdell A H. 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5): 1255~1275.
- Gan Haonan, Wang Guiling, Lin Wenjing, Wang Xiao, Ma Feng, Zhu Xi. 2015. Major reservation types and forming mechanism of HDR resources in China. *Science & Technology Review*, (19): 22~27 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 1994. Crustal heat generation rate and mantle heat flow in southeast China. *Science in China (Series B)*, 24(2): 185~193 (in Chinese).
- 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).
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China. *Chinese Journal of Geophysics*, 59 (8): 2892~2910 (in Chinese with English abstract).
- Liao Zhijie. 2012. Deep-circulation hydrothermal systems without magmatic heat source in Fujian Province. *Geoscience*, 26(1): 85 ~ 98 (in Chinese with English abstract).
- Lin Lefu, Sun Zhanxue, Wang Andong, Liu Jinhui, Wan Jianjun, Li Xiaocong, Luo Xianwen. 2017. Radioactive geochemical characteristics of mesozoic granites from Nanling region and southeast coastal region and their constraints on lithospheric thermal structure. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36 (4): 488~500 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Ma Feng, Liu Chunlei, Wang Guiling. 2012. Potential estimation of HDR resources of mainland China. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(5): 807~811 (in Chinese).

- with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. Assessment of China's geothermal resources and its potential. *Geology in China*, 40(1): 312~321 (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. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 2043~2057 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chuan, Wang Guiling. 2015. Current status and prospect of hot dry rock research. *Science & Technology Review*, 33(19): 13~21 (in Chinese with English abstract).
- Lu Chuan, Lin Wenjing, Gan Haonan, Liu Feng, Wang Guiling. 2017. Occurrence types and genesis models of hot dry rock resources in China. *Environmental Earth Sciences*, 76(19): 646~665.
- Massachusetts Institute of Technology. 2006. The Future of Geothermal Eenergy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century. MIT Press.
- Pang Z H, Reed M. 1998. Theoretical chemical thermometry on geothermal waters: problems and methods. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(6): 1083~1091.
- Pang Zhonghe, Wang Jiyang, Fan Zhicheng. 1990. Calculation of reservoir temperature in Zhangzhou geothermal field by using SiO₂ mixed model. *Scientific Bulletin*, (1): 57~59 (in Chinese).
- Reed M, Spycher N. 1984. Calculation of pH and mineral equilibria in hydrothermal waters with application to geothermometry and studies of boiling and dilution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, (48): 1479~1492.
- Wan Tianfeng, Chu Mingji. 1987. Listric active fault of Fujian and Taiwan. *Journal of Earth Science*, 12(1): 21~29 (in Chinese with English abstract).
- Wang Dezi, Zhou Xinmin. 2002. Genesis and Crustal Evolution of Late Mesozoic Granitic Volcanic-intrusive Complexes in Southeastern China. Beijing: Science Press, 1~295 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Ma Feng, Lin Wenjing, Zhang Wei. 2015. Research progress of reservoir situlation in HDR development projects. *Science & Technology Review*, 33(11): 103~107 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lin Wenjing, Zhang Wei, Lu Chuan, Ma Feng, Gan Haonan. 2016. Research on formation mechanisms of hot dry rock resources in China. *Acta Geologica Sinica* (English Edition), 90(4): 1418~1433.
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1988. Compilation of heat flow data for continental area of China. *Scientia Geologica Sinica*, (2): 196~204 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Huang Shaopeng. 1990a. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd Edition). *Seismology and Geology*, 12(4): 351~363, 366 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. 1990b. Determination of geothermal water circulation depth using geothermal data. *Scientific Bulletin*, (5): 378~380 (in Chinese).
- Xiong Liangping, Wang Jiyang, Pang Zhonghe. 1990. Temperature pattern of Zhangzhou geothermal field, Fujian Province, SE China. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 70~80 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Yuan Yilong, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Feng Bo. 2016. Hot dry rock and enhanced geothermal engineering: international experience and China prospect. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 64(04): 1139~1152 (in Chinese with English abstract).
- 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. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1936~1947 (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).
- Zhang Jian, Wang Beiyu, Tang Xianchun, Dong Miao, Ai Yifei. 2018. Temperature structure and dynamic background of crust and mantle beneath the high heat flow area of the south China continental margin. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 3917~3932 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Ping. 1995. The distribution features of heat generation rate of southeastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 292~305 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 范蔚茗, Menzies M A, 尹汉辉, 郝新才, 陈欣, 邹和平. 1993. 中国东南沿海深部岩石圈的性质和深部作用过程初探. *大地构造与成矿学*, 17(1): 23~30.
- 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 王潇, 马峰, 朱喜. 2015. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式. *科技导报*, (19): 22~27.
- 胡圣标, 汪集旻. 1994. 中国东南地区地壳生热率与地幔热流. *中国科学(B辑)*, 24(2): 185~193.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 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.
- 姜光政, 高珊, 饶松, 张林友, 唐晓音, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集旻. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版). *地球物理学报*, 59(8): 2892~2910.
- 廖志杰. 2012. 福建无岩浆热源的深循环水热系统. *现代地质*, 26(1): 85~98.
- 林乐夫, 孙占学, 王安东, 刘金辉, 万建军, 李小聪, 罗贤文. 2017. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地球化学特征及岩石圈热结构对比研究. *岩石矿物学杂志*, 36(4): 488~500.
- 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, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估. *中国地质*, 40(1): 312~321.
- 蔺文静, 甘浩男, 王贵玲, 马峰. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究. *地质学报*, 90(8): 2043~2057.
- 陆川, 王贵玲. 2015. 干热岩研究现状与展望. *科技导报*, 33(19): 13~21.
- 庞忠和, 汪集旻, 樊志成. 1990. 利用 SiO₂ 混合模型计算漳州地热田热储温度. *科学通报*, (1): 57~59.
- 万天丰, 褚明记. 1987. 闽台铲状活动断裂. *地球科学——中国地质大学学报*, 12(1): 21~29.
- 汪集旻, 黄少鹏. 1988. 中国大陆地区大地热流数据汇编. *地质科学*, (2): 196~204.
- 汪集旻, 黄少鹏. 1990a. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). *地震地质*, 12(4): 351~363, 366.
- 汪集旻, 熊亮萍, 庞忠和. 1990b. 利用地热资料确定地下热水循环深度. *科学通报*, (5): 378~380.
- 王德滋, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代花岗质火山-侵入杂岩成因与地壳演化. 北京: 科学出版社, 1~295.
- 王贵玲, 马峰, 蔺文静, 张薇. 2015. 干热岩资源开发工程储层激发研究进展. *科技导报*, 33(11): 103~107.
- 熊亮萍, 汪集旻, 庞忠和. 1990. 漳州热田温度场. *地质科学*, (1): 70~80.
- 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 侯兆云, 冯波. 2016. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望. *吉林大学学报(地球科学版)*, 64(04): 1139~1152.
- 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. *地质学报*, 92(9): 1936~1947.
- 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.
- 张健, 王蓓羽, 唐显春, 董森, 艾依飞. 2018. 华南陆缘高热流区的壳幔温度结构与动力学背景. *地球物理学报*, 61(10): 3917

~3932. 292~305.
赵平. 1995. 中国东南地区岩石生热率分布特征. 岩石学报, 11(3):

Geothermal, geological characteristics and exploration direction of hot dry rocks in the Xiamen bay-Zhangzhou basin, southeastern China

LIN Wenjing^{*1,2)}, CHEN Xiangyang³⁾, GAN Haonan^{1,2)}, YUE Gaofan^{1,2)}

1) Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, 050061;

2) Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploitation and Development, MNR, Shijiazhuang, 050061;

3) Southern Fujian Geological Brigade, Zhangzhou, Fujian, 363000

* Corresponding author: lwenjing@msn.com

Abstract

The tectonically active southeastern coast of China is located in the subduction zone of the Eurasian Plate and the Philippine Sea Plate. At the same time, this area is also the main source of high radioactive granite in China. Development of large areas of Mesozoic acid granite bodies has resulted in abundant occurrence of hot dry rock. On the basis of regional geothermal and geological background, the Xiamen bay-Zhangzhou basin in the southeast coast of Fujian was selected for detailed investigations. The formation conditions of hot dry rock resources in this area are systematically analyzed from the perspective of regional geothermal flow, geothermal gradient, geothermal temperature, hot water circulation depth and deep temperature of geothermal reservoir. A suitable depth for exploration of the future hot dry rock resources in this area is scientifically calculated based on the data. The results show that (i) the average geothermal gradient in the area is about 18.3℃/km, lower than the average value for the continental areas; and (ii) the radioactive heat generation rate of the granite is only slightly higher than the global average value of the granite. The relatively high value of surface heat flow in the area is mainly due to mantle heat conduction, and the contribution of radioactive elements to heat generation is relatively low. The future development of hot dry rock resources in the area should take full account of the influence of deep heat source conditions, the thickness of ground cover and regional faults on drilling engineering. These factors will provide a framework guiding future exploration and development of hot dry rock resources in this area.

Key words: temperature of geothermal reservoir; hot dry rock; formation conditions; suitable depth for exploration; Xiamen bay-Zhangzhou basin