

闽南沿海地区钻孔实测热流值及深部温度预测

许益青

(福建省闽南地质大队, 漳州, 363000)

摘要 依据近年来在闽南沿海地区陆续施工的 5 口千米钻孔的系统测温数据和岩石样品实测热导率、生热率, 对钻孔所在地区地温梯度、热流值进行计算, 同时根据一维稳态模型对深孔可能钻遇温度进行了预测。5 口千米钻孔地温梯度为 17.0~30.1 °C/km, 平均 20.3 °C/km, 略低于大陆地区平均值 (25~30 °C/km); 岩石热导率为 2.95~3.20 W/m·K, 平均为 3.11 W/m·K; 放射性生热率为 2.52~2.97 μ W/m³; 计算的大地热流为 54.06~96.02 mW/m², 平均为 63.2 mW/m², 略低于全球大陆地区热流平均值 65 mW/m²。利用岩石热导率、生热率和热流值数值, 计算出钻孔深部 12 条可能的温度分布剖面。计算结果表明, 超深并于 2 000 m 垂直深度上的温度为 51~84 °C; 4 000 m 垂直深度上的温度为 78~142 °C; 理论上, 只要深部的水文地质条件满足, 是可以取得具有开发利用价值的地热流体, 但从干热岩勘察开发角度出发, 其勘察深度以 5~6 km 为宜, 同时为了避免浅部地下水径流的干扰, 钻孔位置宜选择远离断裂或者取断裂的下盘位置。

关键词 千米钻孔 地温梯度 热流 深部温度 干热岩 闽南沿海

大地热流是地下热能在地壳表面的综合反映, 是表征地球内部热状态的重要参数, 地壳深部温度是干热岩开发选址中首先考虑的因素^[1-3]。根据地区实测热流值、热导率、生热率等数据对地壳深部温度进行预测, 其结果能够为闽南沿海地区干热岩靶区的选址提供参考。

近年来, 闽南沿海 (特别是沿海旅游城市) 为了开发利用中深部的地热资源, 陆续施工了 5 口千米钻孔进行干热岩勘察开发和隐伏地热调查 (图 1), 钻孔位置的选择根据地球物理解译及有关资料研究^[4-6]进行确定, 5 口千米深钻孔分别位于东山县樟塘村, 龙海市隆教乡白塘湾、红星村, 龙海市东泗乡清泉林场, 诏安新村, 钻孔深度分别为 2 014.3 m、2 000.37 m、1 259.13 m、4 002.96 m、1 200 m。依据五口钻孔的系统测温数据、实测岩石样品热物性参数, 分别计算地温梯度及热流值, 并对钻孔深部可能钻遇温度进行了预测。

1 钻孔位置

1.1 龙海东泗清泉林场钻孔

钻孔位置为山间盆地地形, 地表覆盖第四系及火山岩盖层, 下伏燕山期花岗岩。钻孔西北侧地表热异常显示强烈, 其西北侧约 17 km 为漳州地热田, 东南侧约 9 km 为龙海东泗松

项目来源: 福建省广义地质项目“福建省深部地热资源潜力调查评价”(项目编号: 20140207)。

收稿日期: 2019-06-20

作者简介: 许益青 (1983-), 女, 工程师, 主要从事水工环地质调查。

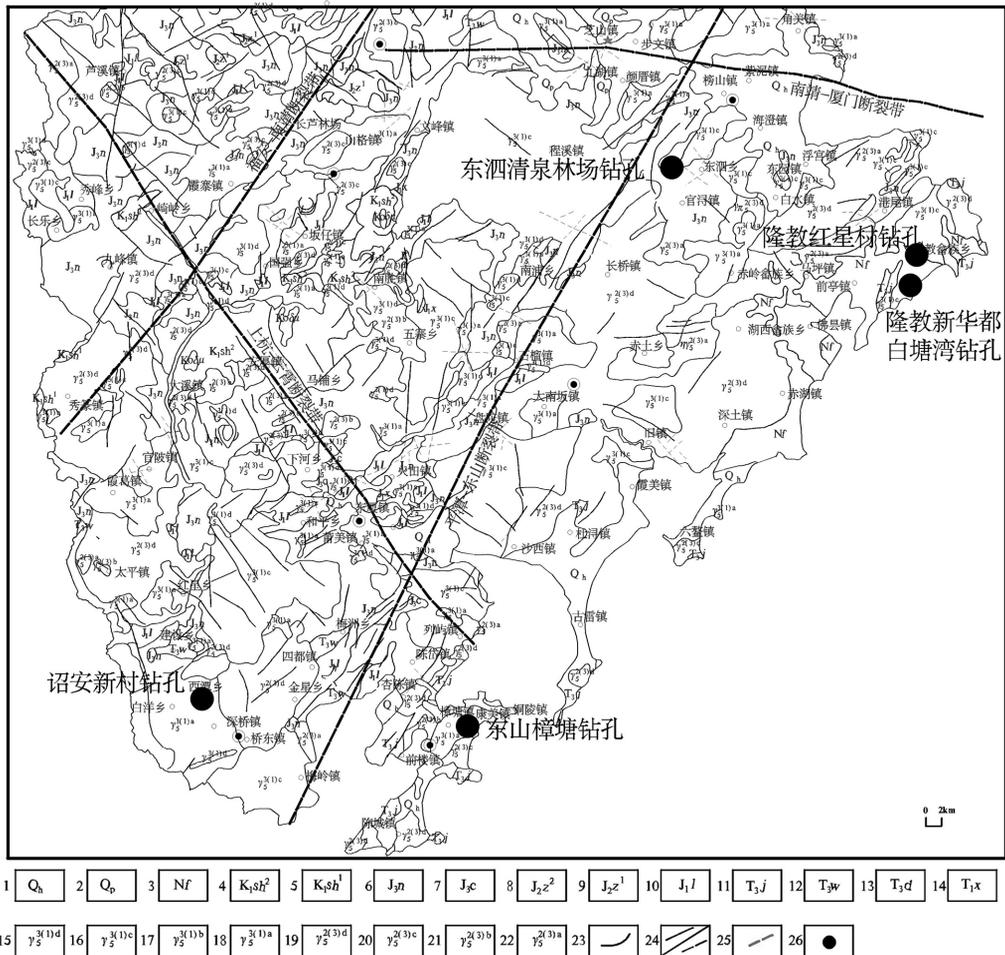


图 1 闽南沿海施工深孔位置及地质简图

Fig 1 Deep hole position and geological diagram in the construction of southern Fujian province

1—全新统；2—更新统；3—佛昙组；4—石牛山组上段；5—石牛山组下段；6—南园组；7—长林组；8—漳平组上段；9—漳平组下段；10—梨山组；11—焦坑组；12—文宾山组；13—大坑村组；14—溪口组；15—燕山晚期第一阶段第四次侵入；16—燕山晚期第一阶段第三次侵入；17—燕山晚期第一阶段第二次侵入；18—燕山晚期第一阶段第一次侵入；19—燕山早期第三阶段第四次侵入；20—燕山早期第三阶段第三次侵入；21—燕山早期第三阶段第二次侵入；22—燕山早期第三阶段第一次侵入；23—地质界线；24—实测性质不明断层；25—深大断裂；26—施工深孔位置

岭温泉。选址的依据主要基于深部地球物理勘探认为东南沿海存在地幔上隆，在漳州地热田下部存在低速体，推测存在高温岩体，进而通过地面调查结合地球物理勘探及施工条件综合确定（图 2）。

1.2 诏安新村钻孔

钻孔位于诏安西潭乡南侧山间盆地无盖层的花岗岩区域。钻孔选址时通过临近温泉分布特征及构造延伸方向关系分析，并根据地球物理勘察分析确定的。在钻孔浅层测温时圈定了一条北东向的地温异常带（7 m 测温等值线，最高水温 24.36℃），2015 年施工一浅孔（100 m），孔底温度约 32.65℃，最高水温 24.36℃，同时通过地球物理勘察及构造延伸关系的推

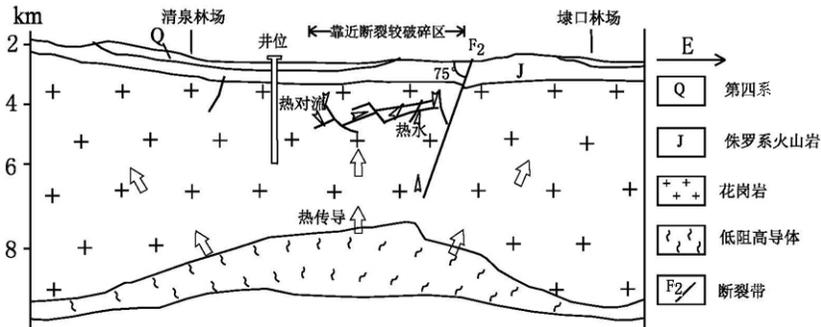


图 2 龙海东泗清泉林场钻孔选址概念模型

Fig 2 Conceptual model of drilling site selection in Qingquan Forest Farm of Dongsì village, Longhai city

测, 基本确定新村一带存在明显的地热异常。

1.3 隆教红星村钻孔和白塘湾钻孔

两孔均位于龙海隆教乡西南侧。周边发育北西向 F_1 、 F_2 断裂 (图 3) 在地表上有比较清晰的反映, 构造痕迹以相对密集的构造裂隙组成为主, 沿带伴随有花岗斑岩及石英脉侵入, 在地貌上构成明显的北西向负地形。北西向断裂的地热显示明显, 在 F_1 断裂的西北侧发育有汤头温泉。其中隆教红星村钻孔位于 F_2 断裂的延伸区域, 白塘湾钻孔位于 F_1 断裂的延伸区域。

1.4 东山樟塘钻孔

东山岛位于平潭—东山北东向深大断裂带与上杭—云霄大断裂带的交会处, 周边陆域地热活动较为强烈。通过野外地面调查, 陈岱镇至望丝山一带北西向构造裂隙发育, 海湾见有一组呈北西走向的礁石在滩涂分布, 推测钻孔周边存在一组北西走向断裂 F_1 , 倾向北东 (图 4)。在 F_1 断裂的北侧出露有陈岱院前温泉, 东山樟塘钻孔位置则位于该 F_1 断裂的延伸方向樟塘村一带的低洼地带。

2 实测大地热流值

2.1 钻孔热流计算段

2.1.1 考虑因素

钻孔热流值是在假设热传递符合一维稳态热传导情况下计算, 闽南沿海地区施工的深钻孔热流计算段的选择: ①选择不受流体对流影响的地段; ②尽量避开浅部地下水活动强烈带, 避开受承压水顶托扰乱的层段; ③选取岩性较均一的井段, 尽可能采集较多的岩石样品; ④选择停钻时间最长, 测温数据近似为稳态的井段。

2.1.2 热流计算段选择

隆教红星村钻孔: 钻探揭露除表层上部 21.15 m 为玄武岩残积黏性土及半固结的通俗风化含漂砾卵石层与砂层外, 其余为粗粒黑云母花岗岩, 岩石新鲜完整, 偶见裂隙, 岩芯采取率高。孔深 790.27~790.77 m 段发育有垂直张性裂隙, 861.05 m 发育一近水平裂隙, 孔深 1176.03~1177.33 m 裂隙发育。分别在钻进至 760 m、790 m、1000 m、终孔后进行系



图 3 龙海隆教红星村、白塘湾钻孔构造略图
 Fig 3 Hole structure sketch in Hongxing Village and Baitang Bay of Longjia town, Longhai city

1—全新统海积层；2—更新统残积层；3—佛昙组；4—三叠系焦坑组；5—燕山晚期第一阶段第二次侵入；6—地质界线；7—实测或性质不明断层；8—断层代号；9—施工钻孔位置

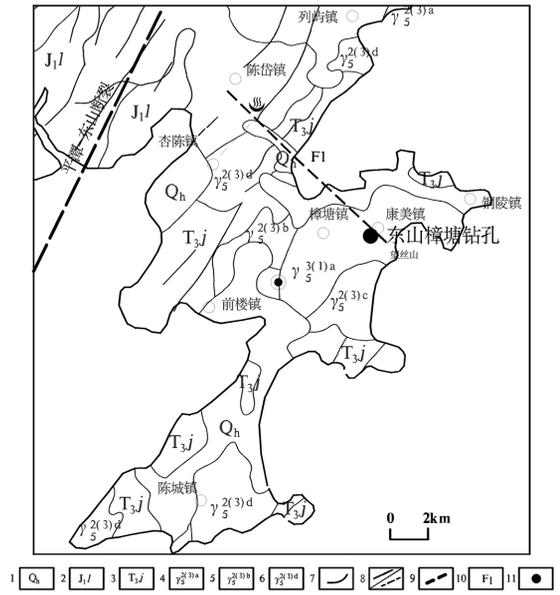


图 4 东山樟塘钻孔位置构造略图
 Fig 4 Sketch of drilling position structure in Zhangtang town, Dongshan county

1—全新统；2—梨山组；3—三叠系焦坑组；4—燕山早期第三阶段第一次侵入；5—燕山早期第三阶段第二次侵入；6—燕山早期第三阶段第四次侵入；7—地质界线；8—实测或性质不明断层；9—深大断裂；10—断层代号；11—施工钻孔位置

统测温。因此根据地层揭露情况，选择岩性均一、构造裂隙不发育的，停钻时间最长，钻孔温度与深度相关性最好（图 5-a），近似稳态的 200~760 m 段作为热流计算段。

隆教新华都白塘湾钻孔：钻探揭露地层 0~4 m 为第四系；4~92 m 为玄武岩、泥岩互层；其下为裂隙不发育或者充填裂隙的花岗岩。100 m 以深钻孔温度与深度间有较好的线性关系，呈现传导型增温特点（图 5-b），因此选择 100~1 850 m 作为热流计算段。

东山樟塘钻孔：钻探揭露除表层上部 46 m 为第四系松散堆积物及花岗岩残积黏性土外，其余为黑云二长花岗岩，间断取芯的岩石新鲜完整。200 m 以深钻孔温度与深度间有较好的线性关系（图 5-c），呈现传导型增温特点，因此选择 200~1 950 m 作为热流计算段。

东泗清泉林场钻孔：钻探揭露的覆盖层厚度为 36 m，其下为整块的黑云母花岗闪长岩体。500 m 以深钻孔温度与深度间有较好的线性关系（图 5-d），呈现传导型增温特点。因此选择停钻 144 h，499~3 997 m 作为热流计算段。

诏安新村钻孔：钻探揭露地层均为较为完整的花岗岩岩体，裂隙不发育。200~720 m 增温明显，线性相关性高于 720 m 至孔底（图 5-e），故选择停钻时间最长，近似稳态的 200~720 m 作为热流计算段。

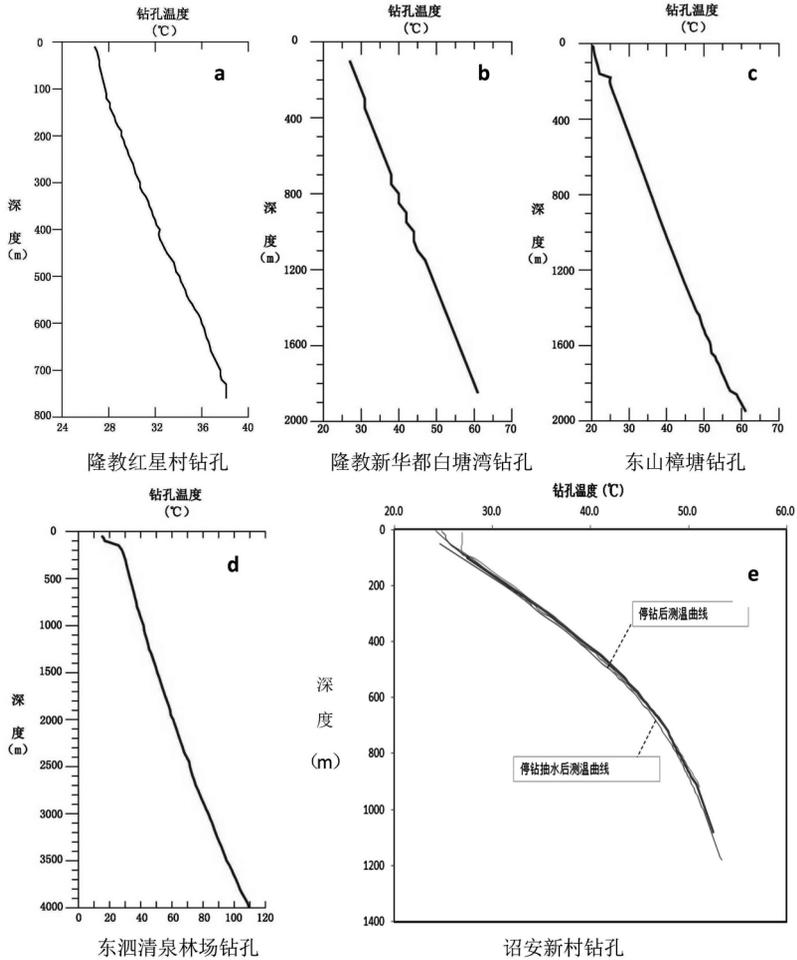


图 5 钻孔测温曲线图

Fig 5 Temperature measurement curve of the drill hole.

综合考虑，选出了以上 5 口钻孔热流计算段（表 1）。

表 1 闽南沿海地区深钻孔热流计算段

Table 1 Heat flow calculation section of gun drillings in the coastal areas of southern Fujian

序号	钻孔位置	钻孔深度 (m)	测温段 (m)	热流计算段 (m)	计算段岩性	测温时间 (停钻时间)
1	东山樟塘	2 014.30	10.00~1 950.00	200.00~1 950.00	二长花岗岩	2016 年 11 月 12 日 (停钻时间约 85 d)
2	隆教新华都白塘湾	2 000.37	100.00~1 850.00	100.00~1 850.00	二长花岗岩	2017 年 3 月 21 日 16:00 (停钻时间约 86 d)
3	东泗清泉林场	4 002.96	48.00~3 997.00	499.00~3 997.00	黑云母花岗岩	2016 年 1 月 25 日 (停钻 144 h)
4	隆教红星村	1 259.13	10.00~1259.13	200.00~760.00	黑云母花岗岩	2013 年 9 月 21 日 8:00 (停钻 224 h)
5	诏安新村	1 200.00	4.40~1180.00	200.00~720.00	花岗岩	2018 年 2 月 2 日停钻大于 400 h

2.2 测热导率

根据不同岩性段采取不同深度处的岩石送往华东理工大学做岩石热导率测试, 测试统计结果 (表 2)。由于闽南沿海地区施工的钻孔揭露基岩主要为花岗岩, 岩性比较单一, 此类岩类热导率的偏差很小, 因此在钻孔热流计算段内直接采用计算段内实测的样品热导率算术平均值。

表 2 闽南沿海地区深钻孔岩石热导率测试统计结果

Table 2 Statistical results of thermal conductivity test of deep drilling rock in the coastal areas of southern Fujian

钻孔位置	岩石取样个数 (件)	岩石热导率 (W/m·K)		
		最大值	最小值	平均值
东泗清泉林场	25	4.54	2.06	3.0014
隆教红星村	3	3.09	3.27	3.18
隆教新华都白塘湾	3	3.55	2.57	3.183
诏安新村	14	2.64	3.72	3.196
东山樟塘	5	2.08	3.62	2.9488

2.3 地温梯度

热流计算段内的地温梯度采用最小二乘法^[7]求取, 线性回归方程式:

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

式中: T_0 为回归直线与温度坐标 T 的截距, 当无其他因素干扰时, T_0 等于恒温带的温度; G 为回归直线的斜率, 即热流计算段内的地温梯度。

上述钻孔热流计算段内的线性回归方程式、地温梯度取值 (表 3)。

表 3 钻孔热流计算段内地温梯度计算结果

Table 3 Calculation results of temperature gradient in the interior of drilling heat flow calculation section

钻孔位置	热流计算段 (m)	线性回归方程式及相关系数 (R^2)	地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)
东山樟塘	200.00~1950.00	$Y=0.01998X+20.06 R^2=0.996$	20.0
隆教新华都白塘湾	100.00~1850.00	$Y=0.01976X+24.19 R^2=0.9986$	19.8
东泗清泉林场	499.00~3997.00	$Y=0.02175X+18.81 R^2=0.995$	21.8
隆教红星村	200.00~760.00	$Y=0.017017X+25.57 R^2=0.999$	17.0
诏安新村	200.00~720.00	$Y=0.0301X+27.008 R^2=0.989$	30.1

2.4 热流值计算

根据热流密度计算公式 $q = -\lambda dT/dz$, 计算钻孔所在位置的大地热流值, 并按温度数据和岩石热导率数据的来源和质量对热流值进行分类, 得出热流值及分类结果 (表 4)。

表 4 闽南沿海地区地区实测热流值

Table 4 Measured heat flow value in the coastal areas of southern Fujian

钻孔位置	测温段 (m)	热流计算段 (m)	地温梯度 (°C/km)	岩石热导率 (W/m·K)	大地热流值 (mW/m ²)	热流值 分类
东山樟塘	10.00~1 950.00	200.00~1 950.00	20.0	2.948 8	58.89	A
隆教新华都白塘湾	100.00~1 850.00	100.00~1 850.00	19.8	3.183	63.02	A
东泗清泉林场	48.00~3 997.00	499.00~3 997.00	21.8	3.001 4	65.28	C
隆教红星村	10.00~1 259.13	200.00~760.00	17.0	3.18	54.06	B
诏安新村	4.4~1 180.0	200.00~720.00	30.1	3.196	96.2	C

备注：根据数据质量和特点将热流值分为 A、B、C、D 四类。其中 A、B 类数据质量较高，C 类数据质量较低或质量不明，D 类数据为地热异常区内测试结果，不具有区域代表性的数据。

总体来看，闽南沿海地区钻孔的地温梯度变化幅度大（17.0~30.1°C/km），平均地温梯度为 20.3°C/km，低于大陆地区平均值（25~30°C/km）；花岗岩热导率的偏差很小（2.95~3.196 W/m·K），平均热导率为 3.11 W/m·K；计算出的热流值为 54.06~96.2 mW/m²，平均值为 63.2 mW/m²，略低于全球大陆地区热流平均值^[8] 65 mW/m²。但实测的热流值受到地形起伏、地下水活动及数据分布等各因素的影响，无法反映区域地温场的全貌，区域热流值需要通过其他方法进行估算。

3 钻孔深部温度预测结果

3.1 一维（垂向）稳态模型

该模型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^[9]：

$$\frac{d}{dz} \left\{ K(T) \frac{dT(z)}{dz} \right\} + A(z) = 0 \quad (1)$$

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：

$$T(0) = T_0$$

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_0 = \frac{q_0}{K_0} \quad (2)$$

式中： T_0 为地表年平均温度，东部取 21°C； K_0 为现今地表样品实验室条件下的实测热导率值（W/m·k）； q_0 为地表热流（mW/m²）。

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，东部取上限 10 km）； K 为常数根据“中国大陆地区大地热流数据汇编”的测试数据，东部岩石热导率均值取为 3.104 W/m·k，西部岩石热导率均值取为 3.449 W/m·k；则其分析解为：

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

①

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

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

3.2 模型的单孔校验

利用分析解①和②分别对闽南沿海地区钻孔孔底深度进行校验, 其中隆教红星村钻孔及东泗清泉林场钻孔生热率为实测(表 5), 其余钻孔根据所处的水文地质条件参照隆教红星村钻孔, 得出模型校验结果(表 6)。

表 5 岩石生热率测试结果

Table 5 Test results of rock heat generation rate.

钻孔位置	岩石取样个数 (件)	岩石生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)		
		最大值	最小值	平均值
东泗清泉林场	20	3.80	1.35	2.97
隆教红星村	57	3.76	1.67	2.52

表 6 闽南沿海地区深钻孔孔底温度与模型估算温度偏离结果

Table 6 Temperature deviation from temperature and model estimation of the deep hole bottom in the coastal areas of southern Fujian

钻孔位置	钻孔深度 (m)	大地热流 (mW/m^2)	测井深度 (m)	孔底温度 ($^{\circ}\text{C}$)	热导率 ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)	生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	式①估算		式②估算	
							$T(Z)$	式①偏离度 (%)	$T(Z)$	式②偏离度 (%)
东山樟塘	2.014	58.9	1.95	61.2	2.949	2.52	88.8	45.20	58.3	-4.63
隆教新华都白塘湾	2	63.0	1.85	61.0	3.183	2.52	83.2	36.35	56.3	-7.75
	4.003	65.3	2.58	81.9	3.001	2.97	119.6	46.03	74.0	-9.69
东泗清泉林场	4.003	65.3	3.35	95.0	3.001	2.97	145.7	53.48	88.3	-7.00
	4.003	65.3	4.00	109.6	3.001	2.97	167.1	52.44	100.0	-8.72
隆教红星村	1.259	54.1	0.76	38.1	3.18	2.52	45.3	18.90	33.7	-11.57
诏安新村	1.2	96.2	0.72	47.5	3.196	2.52	53.4	12.49	42.5	-10.59

注：以上钻孔均为钻探至相应深度时的近似稳态测温；式②采用迭代法^[10]计算，迭代层厚度为 1 km。

式①计算结果均为正偏离，且偏离幅度离散性很大，从 18.9%~53.48%；式②估算值均为负偏离，且偏离度均在 -12% 以内，因此此次钻孔深部温度预测采用式②进行预测。经过分析，隆教红星村深钻孔受地下水上升运动的影响较大，因此造成偏离度较大。

3.3 深部温度预测结果

为了预测最后超深井可能钻遇的温度，根据施工的深钻孔实测热导率、热流值和生热率值利用式②对闽南沿海地区超深钻孔可能钻遇温度进行预测，热流值上限取 $100 \text{ mW}/\text{m}^2$ ，下限取 $50 \text{ mW}/\text{m}^2$ ，热导率取均值 $3.11 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ，生热率上下限取值(表 7)，绘制 1~10 km 深度内 12 条可能的温度分布曲线(图 6)。

表 7 深部温度计算采用的有关岩石热物性和地热参数

Table 7 Deep temperature calculation used in thermal properties and geothermal parameters of rocks

参数	上限	下限
地表热流值 (mW/m^2)	100	50
热导率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	3.18	2.95
生热率 ($\mu\text{W}/\text{m}^3$)	2.97	2.52

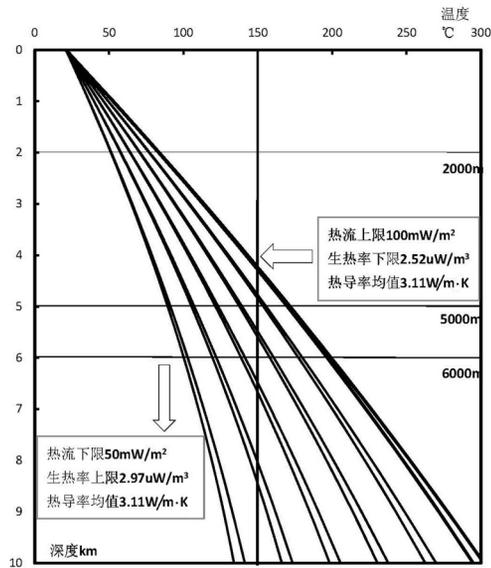


图 6 闽南沿海地区钻孔深部温度预测结果

Fig 6 Prediction results of deep drilling temperature in the coastal areas of southern Fujian

计算结果显示, 超深并于 2 000 m 垂直深度上的温度为 51~84℃; 4 000 m 垂直深度上的温度为 78~143℃; 5 000 m 垂直深度上的温度为 89~172℃; 理论上, 只要深部的水文地质条件满足 (合适的部位及深度), 是可以取得具有开发利用价值的地热流体, 但从干热岩勘察开发角度 (理论上温度至少达到 150℃) 出发, 其勘察深度在 5~6 km 为宜, 同时为了避免浅部地下水径流的干扰, 钻孔位置宜选择远离断裂或者取断裂的下盘位置。

参 考 文 献

- 1 汪洋. 中国大陆大地热流值分析. 北京: 中国科学院地质研究所, 1999.
- 2 汪集旸, 熊亮平, 庞忠和. 中低温对流型地热系统. 北京: 科学出版社, 1993.
- 3 汪集旸, 熊亮平, 庞忠, 等. 中国东南地区大地热流研究及地热资源评价, 中国科学院地质研究所, 1991.
- 4 蔺文静, 王凤元, 等. 福建漳州干热岩资源选址与开发前景分析. 科技导报, 2015, 33 (19).
- 5 许益青. 福建省龙海市隆教中深层地热资源形成地质条件分析. 福建省地质学会论文, 2014.

- 6 郑银昌. 福建省龙海市隐伏地热成控条件及地热地质特征初探. 西部探矿工程, 2016.
- 7 任战利. 山西沁水盆地沁参 1 井大地热流值确定. 地质科学, 1998, 33 (2).
- 8 汪洋, 汪集暘, 熊亮平. 中国大陆主要地质构造单元岩石圈地热特征. 地球学报, 2001, 1 (22) 8.
- 9 G. 邦特巴思著, 易志新, 熊亮萍译, 汪集暘校. 地热学导论. 北京: 地质出版社, 1988.
- 10 马峰, 蔺文静, 等. 我国干热岩资源潜力区深部热结构. 地质科技情报, 2015, 34 (6).

Measured Heat Flow Value of Drilling and Deep Temperature Prediction in Coastal Areas of Southern Fujian

Xu Yiqing

(South Fujian Geological Party, Zhangzhou, 363000)

Abstract

According to the system temperature measurement data of drilling (5km) and the measured thermal conductivity and heat generation rate of rock samples in the coastal areas of southern fujian in recent years, calculating the geothermal gradient, heat flow value, then according to one-dimensional stability the state model to predict the temperature of deep drilling as well. The geothermal gradient of drilling is between 17.0–30.1°C/km, and the average geothermal gradient is about 20.3°C/km, which is slightly lower than the continental average (25–30°C/km); The thermal conductivity of rock is 2.95–3.20W/m.K, the average thermal conductivity is 3.11W/m.K; the radioactive heat generation rate is between 2.52 and 2.97uW/m³; The calculated geothermal heat flow is between 54.06–96.02mW/m², and the average value is 63.2mW/m². It is slightly lower than the average heat flux of 65 mW/m² in the global mainland. At the same time, using the thermal conductivity, heat generation rate and heat flow value of the rock, distributing 12 possible temperature profiles in the deep drilling. Results show that the temperature at the vertical depth of 2000m is between 51–84°C; the temperature at the vertical depth of 4000m will be between 78–142°C; Theoretically, as long as the deep hydrogeological conditions are met (appropriate part and depth), it is possible to obtain geothermal fluids with development and utilization value, but from the perspective of dry hot rock exploration and development (theoretical temperature is at least 150°C), the survey depth is 5–6km, and in order to avoid shallow groundwater runoff For interference, the location of the hole should be chosen to be away from the fracture or the position of the lower plate.

Keywords kilometer drilling, geothermal gradient, heat flow, deep temperature, dry hot rock, coastal area of southern fujian