

福建无岩浆热源的深循环水热系统

廖志杰

(北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要:近年来对福建省存在具有岩浆热源的高温水热系统的呼声甚高。因而在福建是否可能存在具有岩浆热源的高温热田再次成为必须回答的重要问题。在综述前人研究成果的基础上,论述了福建省地热活动的地质构造背景、温泉分布状况、地热系统的特征、深部是否存在岩浆热源以及地壳的热结构,系统论述了福建深循环水热系统的特征。认为由于地质构造条件所决定,福建有大量的温泉出露,其中大部分为中温水热系统($90 \sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)和低温水热系统($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$),均属受断裂控制的深循环水热系统,皆为温水热储。极少数高温热水系统($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$)也仅仅是地下水沿断裂循环的深度较大所致。笔者认为福建不具备形成“有岩浆热源的水热对流系统”的条件。

关键词:福建;温泉;铲状断裂系统;岩浆热源;深循环水热系统

中图分类号: P641

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2012)01-0085-14

Deep-Circulation Hydrothermal Systems Without Magmatic Heat Source
in Fujian Province

LIAO Zhi-jie

(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In recent years, the voice that Fujian has high-temperature geothermal systems with magmatic heat source is very high. So it is a must to answer the important question. The author reviews the researched achievements of predecessors and discusses following topics: the geological setting of geothermal activity in Fujian, distribution of thermal springs, types of geothermal systems, magmatic heat source in the depth and heat structure of crust in this paper. According to the setting of geological tectonics in Fujian Province, a large number of medium-temperature ($90 - 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) and low-temperature ($<90\text{ }^{\circ}\text{C}$) hydrothermal systems are controlled by faults and become the warm water reservoir by means of deep circulation. The limited hot water systems with higher temperature ($>150\text{ }^{\circ}\text{C}$) formed through deep circulation in the depths of earth crust. The author thinks that Fujian Province does not have the tectonic setting to form hydrothermal systems with magmatic heat sources.

Key words: Fujian Province; thermal spring; shovel-shape fracture system; magmatic heat source; deep-circulation hydrothermal system

0 问题的提出

福建是我国温泉较多的省份之一,全国排名第五,位于滇、藏、川、粤之后。温泉分布广、温度也较高、流量大。早在20世纪80年代,对于福建温泉的性质、资源潜力就有了比较客观、理性

的认识。其代表性的基本观点罗列如下:

1986年万天丰^[1]认为:与中国东部各省相比,福建省的水热系统分布广、数量多,水温比较高;但本地区不具备形成各类高温高热地热系统的客观地质构造条件,以中低温($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$)水热系统为主。

收稿日期: 2011-10-24; 改回日期: 2011-12-05; 责任编辑: 楼亚儿。

作者简介: 廖志杰,男,教授,1935年出生,构造地质和地热地质专业,长期从事滇藏地热资源研究。

Email: liaozhijie3502@126.com。

1988年庄庆祥对福建省最高温的漳州地热田的成因模式进行了探讨^[2],认为漳州热田属于深循环型,其模式如下:大气降水由热田西部、北部、南部经由NW、NNW、NNE向断层、节理汇入至热田附近,在以上断裂交接复合部位沿地堑式活动断层作深循环,体积膨胀上升至地表形成温泉或浅层地热水。漳州地下10 km深处存在高温高导低速层,如果为热储,水温可达300℃以上。同年庄庆祥与韩庆之合作,依据福建沿海一带大地构造情况、分析了漳州盆地局部地质构造特征、地温场显示特征、地下热水的动态变化以及不同深度地下热水的化学组分,认为漳州地热区主要热源来自老断裂的重新活动,地下热水的主要来源是大气降水。认为热水的循环深度为1 500~2 000 m^[3]。

20世纪80年代末,中国科学院地质研究所地热研究室与福建省第一水文地质队合作,研究了漳州地热田的成因^[4]。认为漳州地热田是在较高的区域热背景(热流密度为70 mW/m²)之下,大气降水($\delta D = -52.3\text{‰}$, $\delta^{18}O = -7.66\text{‰}$)由盆地边缘的补给区向盆地中心的排泄区不断运移的过程中,随深度增大,地下水由岩石中获取热量,形成热水,并在3.5~4.0 km深处达到140℃左右。热储中的热水择地质条件有利的部位,即沿着因新构造断裂交汇而形成的高渗透率带上涌至地表,形成高温中心。热水上涌至第四系含水层,与其中的冷水发生混合作用,形成了热中心外围的中低温地下热水。漳州热田的热水为热咸水,是大气降水与海水在水热系统深部混合的结果。

1994年中国科学院地质研究所地热研究室陈墨香等^[5]认为:福建省自中生代以来构造活动强烈,各种不同方向的断裂十分发育,为地下水的深循环提供了渗透性良好的通道,所以福建省的温泉和热田属于深循环对流型水热系统。根据地下热水中SiO₂(玉髓)温标计算,热储的平均温度为110℃,其中福州、漳州、厦门杏林湾等热储的温度可达120~140℃,热水的循环深度为3~4 km,属于中低温地下热水,适宜于非电直接利用。陈墨香等^[5]还认为福建单个水热区的面积一般为0.1~0.3 km²,最大者如漳州和福州不超过10 km²,全省193个水热区的面积为66.4 km²,在2 000 m深度内所含热能为38.31 EJ/a,相当于13.07亿t标准煤。

进入21世纪,作为低碳能源的地热能受到人

们日益的关注。福建省的部分地热工作者也热切盼望着打出高温地热能以便于生产二次能源。他们认为在闽南沿海是寻找高温地热资源的有利地带,其主要根据是:(1)天然温泉出露较多,占全省的70%以上,地温梯度3~5.2℃/100 m,漳州地区90多米深处探明有121℃的高温地热水。(2)地震活动频繁,在微震震中密集区构成两个明显透镜体,推测与近代岩浆活动有关,深部发育NEE向切穿莫霍面的滑脱断裂。(3)该区中新世和上新世发生过火山喷发。(4)地形差异升降异常明显。这种独特的地质构造条件,说明在福建沿海地区具有大于150℃地下热水的储热构造条件。后来,他们进一步提出:根据闽东南沿海地质构造条件、地壳升降变形和温泉分布的特点,从沿海云霄陈埭至厦门翔安长约150 km、宽约60 km范围内,深部(3 000~5 000 m)热储温度可达200~300℃,蕴藏着丰富的高温蒸汽型地热资源^[6]。

2010年庄庆祥将福建的温泉分为3种成因类型:火山热成因类型;火山一对流热成因类型;对流热成因类型。(1)火山热成因类型的温泉出露于漳州、厦门和泉州3市。该地域新构造运动十分剧烈,第三纪和第四纪火山喷发极为普遍和强烈。并且根据综合地球物理勘探的结果认为漳州、厦门等沿海一带地壳较薄,1~10 km内有1~3个低速高导层,大地热流值大于2 HFU、背景地热梯度值大于4℃/100 m,说明该地区地壳浅部有岩浆熔融体或其残留体的存在,该地区下方9 km以下有一个规模很大的低速体,其横向延伸100 km,厚度10 km,在华安汰内、厦门、同安、漳浦、泉州永春、德化等地也有深度较浅的低速、高导的熔融岩浆热源体存在,表明这个地区地壳5 km深度内分布着热气相过热中、高温地热能富集区。在漳州、厦门、泉州3市,国土面积仅占全省的1/5,而温泉数占了全省的54%,5 km深度内的地热能储量占全省的60%以上。全省5个温度大于374℃的热气相过热高温热储地热能富集区均位于上述3市内。全省有19个热气相中、高温热储,上述3市分布有14个,占全省的74%。(2)火山一对流热成因类型分布于福州和莆田,该区面积占全省的12.7%,温泉37个,占全省总数的17.2%。其中福州地热田推算5 km深度内热储温度150~374℃,为热气相中温热储。(3)对流热成因类型分布于闽西和闽北,国土面积占全省的66.8%,温泉32个,占全省总数的28.8%。5

km 深度内热储温度 100 ~ 150 ℃, 平均 120 ℃, 为热气相过热低温热储地热能富集区。庄庆祥认为^[7]: 1992 年福建老地热专家估算全省 2 000 m 深度地热能储量相当于 1.5 万亿 t 标准煤。现在他将其评估深度调整为 5 000 m, 采用博尔顿的积存公式, 依据福建东南部沿海地区火山热型热储面积 2 万 km², 热储平均温度 250 ℃; 火山一对流热型面积 3 万 km², 热储平均温度 150 ℃; 对流热型(深部为岩浆岩, 上部覆盖 2 000 m 的非岩浆岩)面积 3.5 万 km², 热储平均温度 120 ℃, 得出福建省 5 000 m 深度内地热能储量相当于 5 万亿 t 标准煤, 其中热储温度大于 150 ℃ 的有经济价值的热储量相当于 5 000 亿 t 标准煤。基于此, 庄庆祥提出了“福建省 50 万千瓦高温岩体地热分布式电站示范工程项目”, 如果得到批准, 就计划在漳州、厦门或泉州的热气相过热中、高温热储地热能富集区布点选址实施。到 2030 年, 福建地热发电能力应达 500 万 kW^[7]。按照这个说法, 那时福建的地热发电值, 将是 2010 年居世界第一的美国的 3 093 MW 的 1.6 倍, 略低于美国计划在 2015 年的地热发电量 5 400 MW^[8], 从而福建地热发电将大跃进超过美国, 居于世界首位。

以上这些看法, 反映出对福建地热的成因、资源潜力有着很不相同的估计, 它实际涉及到福建地热一个根本问题: 福建是否存在高温热田? 它们是否具有岩浆热源?

1 福建省地热活动的地质构造背景

福建省濒临西太平洋活动大陆边缘, 按照板块理论, 似乎应该存在高温地热田。讨论福建的地质构造背景脱离不开台湾。台湾是西太平洋古近纪岛弧的一环, 但主岛上只在北端出现近东西向的火山带, 该岛的向洋侧为向西凹的, 没有海沟。现代地震活动表明, 与日本、琉球岛弧不同, 其深部没有向西倾斜的贝尼奥夫带, 台湾中南部及福建没有现代的火山。台湾位于其东北侧的琉球岛弧与南部的吕宋火山岛弧的交接点, 东邻菲律宾海板块。自 4 Ma 以来, 菲律宾海板块以 7 cm/a 的速度向西北冲向欧亚板块。但是菲律宾海板块的北缘与西缘的运动方式不同^[9]。在北缘(花莲以北), 菲律宾海板块以 45°角沿琉球海沟向西北下插到琉球岛弧之下, 地震震源表现出的贝尼奥夫带厚达 50 km, 当下插深度达到 150 km 时, 其上方地面出现大屯、基隆、龟山岛等火山群。

在台湾南部, 蔡仪本^[10]根据 1973—1983 年的地震资料, 认为在台东市以南存在一个向东倾斜的贝尼奥夫带, 厚约 30 km, 倾角 55°~60°, 在 21°N 和 22°N 之间下插深度达 180 km, 向北变浅, 至 23°N 消失。往南是马尼拉海沟。欧亚板块连同新生代早期打开的南海洋盆向东俯冲到菲律宾海板块之下。奇美、绿岛、兰屿的安山岩是吕宋火山弧的北延, 但喷出年代为新近纪, 比吕宋岛的火山岩年龄要老, 这表明会聚是由北向南发展的。台湾东海岸的海岸山脉是吕宋火山弧和西侧的北吕宋海槽与亚洲大陆边缘碰撞的产物。台东纵谷是欧亚与菲律宾海两个板块之间的近于直立的边界断层, 显示了左行平移的特征^[9]。

台湾岛的主体受到菲律宾海板块强大的压力, 导致地壳发生弹性震动, 即发生地震, 并往西越过台湾海峡影响到福建省。自东往西地震强度由强变弱, 数量由多变少。万天丰等^[1]计算和统计了闽台地区 1971—1982 年各主要地震带(活动断裂带)能量释放的全部资料(表 1)。从表 1 可以看出, 地震次数福建比台湾少一个量级, 而释放的能量福建仅为台湾的万分之一。台湾释放的能量占总释放量的 99.98%, 其中台湾东部的纵谷断裂就占了 85.23%。从图 1 可以看出: 闽台地区所有地震的震源都分布在一个向东缓倾斜面之上, 倾角 4°~10°。万天丰等^[1]将其称为闽台铲状断裂系统, 这可能是因为更新世以来, 由于受向东俯冲的马尼拉海沟的出现的的影响, 使台湾东部纵谷断裂的产状直立, 菲律宾海的洋壳不能向西俯冲, 而菲律宾海板块又继续向西北挤压。闽台地区经过中、新生代岩浆活动与构造运动后已经固结的岩

表 1 闽台地区 1971—1982 年地震的能量释放^[1]

Table 1 Energy release of earthquakes in Fujian and Taiwan during 1971 - 1982^[1]

地震带(活动断裂)	地震次数	释放能量/ 尔格	能量释放的 百分率/%
邵武—河源	156	2.23×10^{19}	0.001 9
政和—丰顺	199	1.10×10^{19}	0.000 93
长乐—诏安	459	1.43×10^{19}	0.001 2
永乐—晋江	64	1.051×10^{18}	0.000 09
九龙江	414	1.30×10^{18}	0.000 1
闽粤滨海	356	1.36×10^{20}	0.011 6
台湾西部	2 786	1.73×10^{23}	14.75
台湾东部	1 343	9.99×10^{23}	85.23
合计	5 777	1.17×10^{24}	100

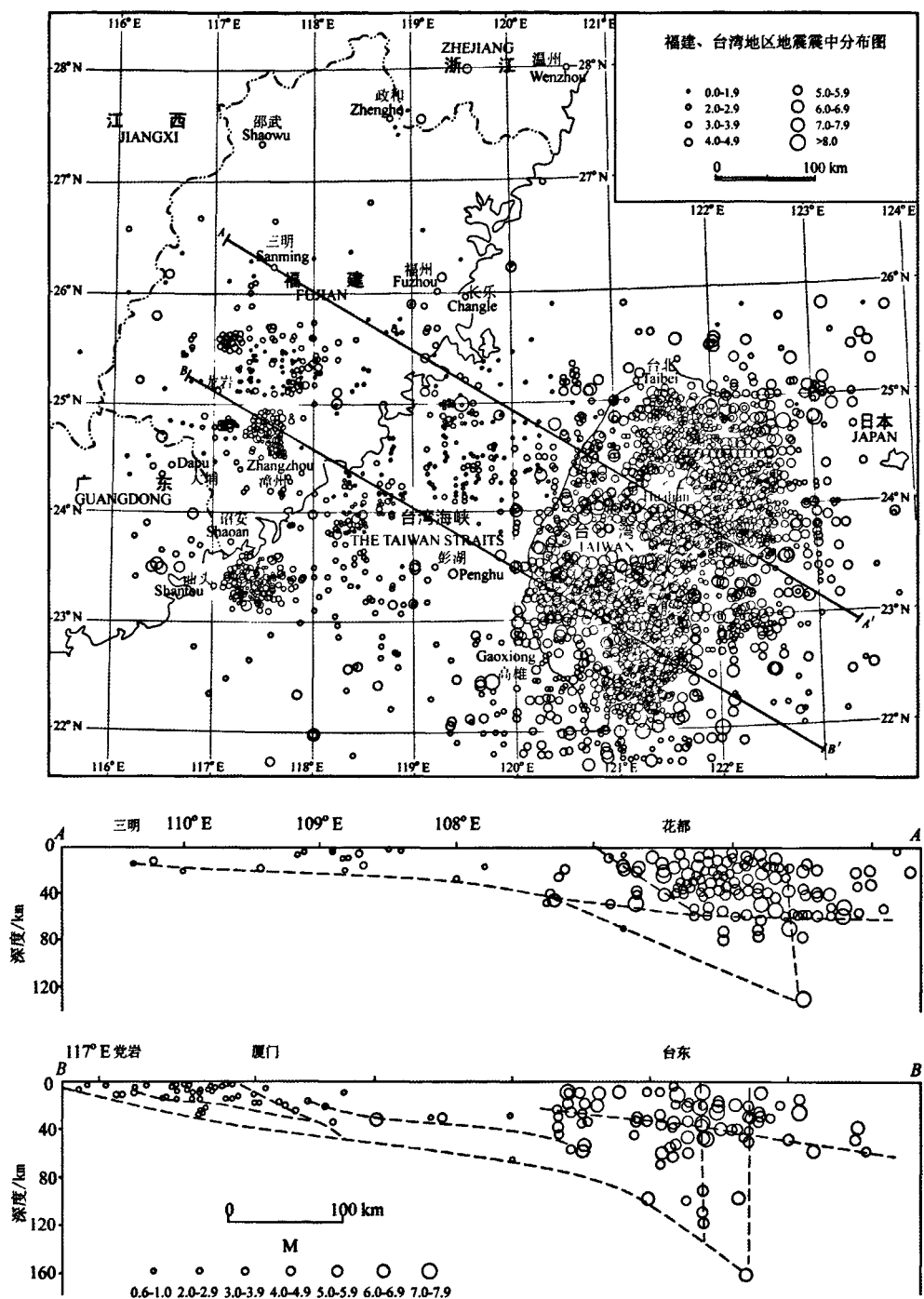


图1 闽台地区(1067-1982)地震震源分布的平面及剖面图^[1]

Fig. 1 Distribution of epicenters of earthquakes in Fujian and Taiwan (1067-1982) and hypocentral profiles of sections AA' and BB'

石圈,在这种水平挤压应力的作用下,朝着最容易释放应力的西北的斜上方向形成一条仰冲的铲状逆掩断裂系统。在地表附近又利用老断层,出现一系列北东向的左行平移—逆断层组和北西向右行平移—正断层组。这个铲状断裂系统正在活动,目前的滑移断距并不算大,但是已经对闽台地区的新构造格局、地貌形态产生了重大影响,

也决定了地热系统的类型和分布。

总之,新生代以来,菲律宾板块没有向西消减到欧亚板块之下,在闽台地区没有西倾的贝尼奥夫带,而是向西挤压,出现平缓东倾的铲状断裂系统,导致闽台地区缺乏新生代中酸性岩浆活动(台湾北部的大屯火山群属于琉球弧除外),断裂网格发育,有利于大量温泉出露。

2 福建的温泉

根据庄庆祥编制的《福建省温泉一览表》^[7], 全省共有温泉 215 处, 其中包括钻孔 22 处。实际的温泉露头 193 处, 其中天然露头泉水温度超过 80 ℃ 的有 10 处, 超过 80 ℃ 的钻孔共 8 处。

根据赵云华等的统计^[6], 福建省大于 30 ℃ 的温泉(含地下热水钻孔)有 196 处, 其中大于 80 ℃ 有 14 处。按地区划分, 闽东南地区福州、莆田、泉州、厦门和漳州 5 市有 131 个, 占 66.8%; 闽西及闽东北地区宁德、南平、三明和龙岩 4 地区、市共 65 个, 占 33.2%。就福建省温泉的天然露头而言, 福建没有沸泉。赵云华等^[6]表列的 14 个高于 80 ℃ 的泉中, 漳州的泉温度为 105 ℃, 实际是钻孔孔口热水温度。

当前由于商业化的炒作, 许多钻孔打出的热水都称之为“温泉”, 实际上它们应称为“人造温泉”, 因为钻孔孔口的温度与温泉水口的温度是不同的。前者是含水岩体中的地下热水绝热冷却后的温度, 而泉是地下水的天然露头。顾名思义温泉就是地下热水的天然露头。温泉的温度是地下热水经历传导冷却之后的温度。

各个国家对于温泉的下限温度并不一致。德国和英国把泉水温度高于 20 ℃ 的泉定义为温泉, 日本定为 25 ℃。早在 1875 年, 美国人吉尔伯特对温泉下了一个科学的定义: “凡温度高于年平均温度 15 ℉ 的泉水叫做温泉或热泉”, 即高于年平均温度 8.3 ℃ 的泉可以称为温泉。近年来, 我国规定 25 ℃ 的泉称为温泉。其实这个规定对于我国青藏高原并不适宜, 把许多向自然界放热的低温温泉排除在外; 对我国华南地区也很不妥, 如福建省年平均温度就在 20 ℃ 左右。所以福建的地热工作者将地下水的温度高于当地年平均温度 10 ℃ 时的泉(即 30 ℃)才可以称为温泉是恰当的。

一般来说, 当泉水温度略高于或等于当地高程的沸点时, 可以称为沸泉(boiling spring), 这时地表会有形形色色的地热显示, 蔚为壮观; 当泉水温度低于地球年平均最高温度(<35 ℃)、又高于当地年平均温度之上 10 ℃ 时可以称为微温泉(tepid spring), 因为它已经向大气圈放热。介于沸泉和微温泉之间的泉统称为温泉或热泉, 依据它们温度的高低可以分成很多等级, 则完全因人而异。

在 20 世纪 70 年代, 有人将泉水温度超过当

地高程沸点温度的泉称为“过热水泉”。在水文地质学中也就有了错误的温泉分类, 最典型的莫过于河北省地质局水文地质四大队主编的《水文地质手册》^[11], 其分类如表 2 所列。这个分类是错误的, 因为自然界只有过热蒸汽, 不存在“过热水”。也不能错误地将达到或微弱超过沸点的饱和水称为“过热水”; 再者既然过热就不会是液气相, 因为所谓液气相就是湿蒸汽; 在过热状态下, 其热焓值必然超过干饱和蒸汽; 所谓高于临界温度的高温过热水也不会存在, 因为在临界点处, 水和蒸汽之间没有差别, 它们具有相同的状态参数, 已经难以区分是水, 还是汽。

表 2 《水文地质手册》^[11] 中温泉的分类
Table 2 Classification of thermal springs in Handbook of Hydrogeology^[11]

相	热水类型	热水名称	温度界限/℃
液相	热水	低温热水	20 ~ 40
		中温热水	40 ~ 60
		高温热水	60 ~ 100
液气相	过热水	低温过热水	> 100
		高温过热水	> 374

(即高于水的临界温度)

在这种错误分类的影响下, 在福建省的地热研究与开发中, 出现了将漳州高温温泉称为“浅层液气相过热低温温泉水”和“浅层气相过热水类型地热田”^[7], 这些称谓不科学, 也不符合热工学的基本概念。

3 福建省的地热系统

“地热”是指地球的内部热能。地热的富集程度足以构成能量资源的系统才能叫做地热系统^[12]。

按照地热系统内储存流体的温度, 可以分为高温地热系统(>150 ℃)、中温地热系统(90 ~ 150 ℃)和低温地热系统(<90 ℃)。

根据地质环境和热量传递方式, 地热系统可以分为以下两个大类^[13]:

(1) 对流型地热系统, 它分为两种: ①与浅成年轻酸性岩浆侵入活动有关并出现在具有高孔隙率和渗透率的地质环境中的水热系统, 我国习惯于简称为“有岩浆热源的水热对流系统”; ②出现在区域热流量高至正常区域以内的低孔隙率—破碎带渗透率环境中的环流系统, 简称为“深循环水热对流系统”。

(2) 传导型地热系统, 也可分为两种: ③存在

于热流量正常或略高于正常的区域以内的高孔隙率和渗透率沉积层(包括地压带)中的低温低焓含水层,简称为“沉积盆地”;④高温低渗透率环境中的干热岩系统,现在称之为增强型地热系统(EGS)。

福建的温泉作为水热对流系统大多数是顺断裂深循环而形成的。福建一些高温水热对流系统是否存在岩浆热源,存在两种完全对立的观点。福建不存在大面积、巨厚层的沉积岩系,因而地压系统和大型沉积盆地不可能存在。大面积的中生代花岗岩体能否构成增强型地热系统则是有待研究的问题。

按照水热系统内所含地热流体的物理特性可以分为:温水系统、热水系统、两相系统和蒸汽系统(图2)。

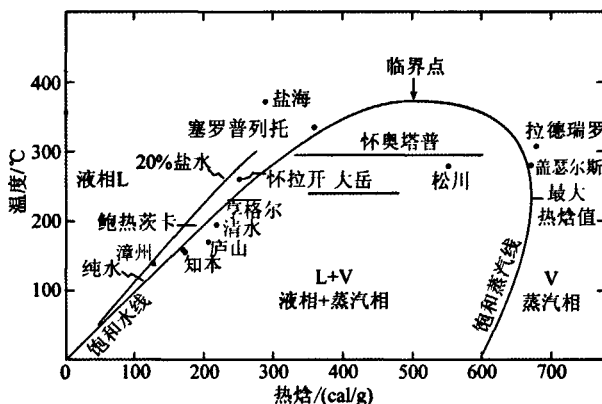


图2 热水与饱和蒸汽的温度—热焓曲线

Fig. 2 Temperature-enthalpy curve between thermal water and saturated steam

温水系统又叫温水储,在主导性热储条件下仅含温度相当低的水的热储,其温度低到不论是在天然条件下,还是在开采条件下,热储环境内部都不会发生沸腾。因此凡温度不足 100 °C 的系统都包含在温水储的范畴内。实测温度达到 200 °C 的某些系统也可以列入温水储的范畴^[12]。

热水系统是 White 提出来的,它是以液态水作为连续的、压力控制的流体相为特征。热水系统中可能有些蒸汽存在,蒸汽一般在浅层低压地带呈分散的气泡形式出现。按照 Donaldson 和 Grant 的定义,热水储与温水储相反,不论在天然状态下还是在开采状态下都能发生沸腾。但是全部开采作业都将在水饱和带内进行。如果水饱和带的埋深过大,就可能存在浅一些的两相区。

两相系统是以液态水为主的系统和蒸汽为主

的系统之间的过渡类型。两相系统中的地热流体为干度不同的湿蒸汽。所谓“干度”乃是指湿蒸汽中所含干饱和蒸汽的质量百分比。

以蒸汽为主的系统:“蒸汽为主”是 White 等^[14]创造的。这类系统的根本特点是排放蒸汽以及蒸汽来源区域的压力基本不随深度而改变。蒸汽排放的初始阶段可能是湿的,也可能是干饱和蒸汽或过热蒸汽。但在开采过程中蒸汽会逐渐变干或逐渐增加过热度。

图2是热水与饱和蒸汽的温度—热焓曲线。从左下角的0点到临界点是饱和水线。在饱和水线左侧区域的流体是液相,为未饱和水,它们在地热储中永远不会发生沸腾,这样的水热系统可以称为温水系统。世界上许多高温地热田都位于饱和水线附近。当分布于曲线右侧时,表明热水中含有若干饱和蒸汽,而饱和蒸汽的热焓超过同温度热水的热焓数倍。当水中含盐度高时,饱和水线就会偏向左侧,如美国盐海的 360 °C 的盐水含盐度达到 25.8%。达到饱和水线的系统称为热水系统,如新西兰怀拉开、墨西哥塞罗普列托和西藏羊八井与台湾清水等。由临界点往右延伸交于热焓值 600 cal/g (0 °C 时饱和蒸汽的热焓值)的这一段曲线叫饱和蒸汽线。饱和蒸汽的最高热焓值为 669.3 cal/g,温度为 232.76 ~ 239.77 °C。在饱和蒸汽线右侧区域的流体是蒸汽相,是过热蒸汽。图2中美国盖瑟尔斯和意大利拉德瑞罗两个干蒸汽田所产出的蒸汽的热焓都大于相同的饱和蒸汽的热焓。可见它们产出的蒸汽是过热蒸汽而不是饱和蒸汽,说明这两个热田的深部必定有额外的附加热源才能促使蒸汽过热。这种只有过热蒸汽和饱和蒸汽的地热系统叫蒸汽系统。饱和水线和饱和蒸汽线所包围的区域是湿蒸汽区,其流体为气水混合物。在该区域内的地热系统称为两相系统。湿蒸汽热焓的位置偏向于饱和蒸汽线,表明其气水比中蒸汽的比重增加,即干度大,例如日本松川地热田虽然以生产蒸汽为主,但那是饱和蒸汽(不是过热蒸汽),而且混入了热水;如果湿蒸汽热焓的位置偏向于饱和水线,湿度就大,如日本大岳地热田。

赵云华等^[6]根据温泉水二氧化硅温度计计算了 206 个泉(含 10 个 < 30 °C 的泉)的深部热储温度,全省 150 ~ 164 °C 的有 7 处,90 ~ 150 °C 有 161 处,小于 90 °C 有 38 处。按照赵云华等的研究,根据二氧化硅地热温度计计算结果,福建有可能

出现的高温地热系统是: 福州市区(161℃)、泉州市德化县南埕(152℃)、厦门市杏林湾(154℃)、漳州市区(164℃)、三明市永安市洪田乡(157℃)、三明市大田县太华乡汤泉(161℃)。因此福建的地下热水属于高温系统的仅有3.4%, 中温系统居多, 占78.2%, 低温系统也不多, 只占18.4%。万天丰等^[1]将164个温泉的二氧化硅温度计计算得出的温度取平均值, 平均温度为115℃, 根据福建省深部地温状况来判断, 地下热水所含的二氧化硅处于平衡状态的深度大致在3~4 km。福建省热储温度>150℃的水热对流系统共7个, 说明地下热水的二氧化硅的平衡深度浅于5 km。

福建省的低温水热系统和温水热系统都是温水系统, 在热储内的地热流体永远不会发生沸腾。但那些高温系统是温水系统还是热水系统, 这是个值得讨论的问题。我们以漳州高温水热系统为例。漳州工人疗养院 ZR14 孔孔深 98.29 m, 孔口水温 105℃, 孔底水温 121.5℃, 从孔底到孔口由于绝热冷却降温 16.5℃。漳州五中地热井井深 200 m, 孔口水温 1989 年为 114℃, 1992 年升到 122℃^[7], 孔底温度未见报道, 考虑到绝热冷却, 估计孔底温度不会超过 140℃。这两个钻孔的热水在地表无疑发生沸腾, 在深部 100 m 和 200 m 处的情况决定于深处的压力。从沸点—深度曲线(图3)看出: 漳州五中 200 m 深处 140℃的热水和工人疗养院 98.29 m 深处 121.5℃的热水都投点在沸点—深度曲线的左侧, 不在曲线之上。而且地下 200 m 深处的沸点应该在 210℃, 地下 100 m 深处的沸点为 180℃^[15]。因此, 漳州热水只是到地表才沸腾。200 m 深处的 140℃的水汽, 绝对不是饱和蒸汽。因为 200 m 深的蒸汽为主的地热田, 其温度应该达到 210℃, 而饱和压力应该达到 2 MPa(图4)。显然漳州地热田的地热流体不具备这样的温度压力条件, 但是漳州地热田应该属于热水系统是可以肯定的。再考虑到漳州的地下热水混入了 1/3 的海水, 也就是说有着高的含盐度, 它也有可能像新西兰的怀拉开一样属于能够沸腾的热水系统之列(图2)。但是它的孔口温度(122℃)和对应的热焓值(123 cal/g)低于台湾的清水、庐山和知本, 台湾的清水和庐山都是沿断裂带排放的重碳酸钠型水, 其深部没有岩浆热源, 它们的温度也远比新西兰的怀拉开为低。怀拉开热田的热储温度达到 270℃, 其地下 7~8 km 深处有一个温度达到 725℃的岩浆囊在支撑, 该

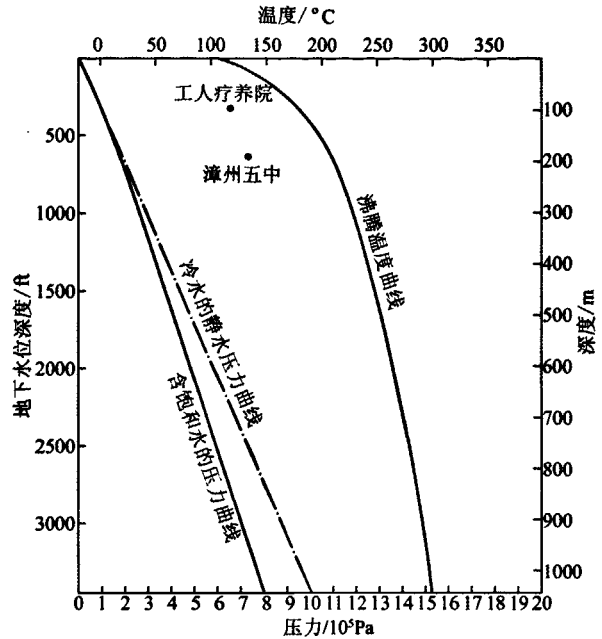


图3 沸点—深度曲线

Fig. 3 Curve of boiling point-depth

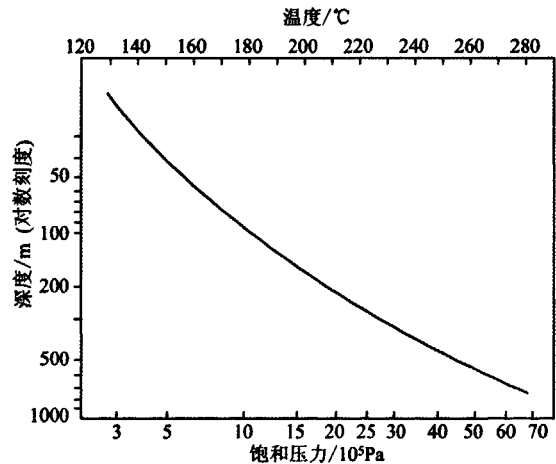


图4 蒸汽为主的地热田沸点—深度理论曲线

Fig. 4 Theoretical curve of boiling point-depth in steam geothermal field

热田中心地段地表热流值达到 700 mW/m²^[16]。而漳州热田也是没有岩浆热源的, 它的二氧化硅温度计计算出的温度为 164℃, 为福建最高的温度。它的高温只因那里的断裂系统发育, 大气水循环的深度较大, 在漳州 3~4 km 就可能达到。

福建省的温泉(无论是高温地热系统, 还是中温地热系统以及低温地热系统)的分布主要受断裂带的控制。在现代构造应力场的作用下, 福建地区的最大主压应力为 NW—SE 向。因此, 北东向的断层为压剪性, 北西向的断层为张剪性, 后者往往成为地热流体排放的主要通道^[1]。为了进一

步弄清活动断裂与温泉分布的关系, 万天丰等^[1]曾对各种活动断裂控制的温泉及其排放的热流量进行统计(表3)。从表3中看出: 与NW向断裂有关的温泉占82.5%, 排放的热流量最大, 占83.4%。显然张剪性的NW向断裂是地下水运移的良好通道。因此NW向断裂, 特别是NW向断裂与其他方向断裂的交叉处, 是寻找地下热水的主要目标。

总之, 福建省的地热系统, 就热储温度而言, 以中温地热系统为主; 就热储流体的物理特性而言, 所有的中、低温地热系统皆为温水储。活动断层带明显控制了温泉的分布, 其中尤以张剪性北西向断层最有利于温泉的出露, 它控制了地下热水的运动。在北西向断层中以九龙江断裂带的热流量最高, 次为永安—晋江断层。而高温地热系统可能是热水系统, 它们是否具有岩浆热源是下面将要讨论的核心问题。

4 福建的温泉是否存在岩浆热源?

一个地区的温泉具有岩浆热源, 则那里地热资源会有质的变化, 会大大增加其能源资源量。倘若开发, 就会极大地促进工农业的发展。部分学者认为福建温泉具有岩浆热源的理由是:

(1) “第三纪、第四纪, 八闽大地火山喷发极为普遍和强烈, 如保留其痕迹至今的大规模的漳州滨海火山口地貌国家地质公园、漳州盆地中央的圆山火山圆锥地貌、漳州盆地众多丘陵山包顶部分布着的火山喷出物——黑色硅质岩; 龙海牛头山火山口、镇海火山、漳浦佛昙等火山口、德化石牛山环形火山口地貌、西带的明溪宁化湖村等火山口, 中带的屏南至闽清、漳平、华安一带

等火山口喷出的碱性橄榄岩、玄武岩; 永安坑边大规模成片分布的火山喷发堆积物; 闽南、闽中分布的大面积火山岩等, 在火山口附近均有温泉分布, 可见火山岩浆上隆活动为地壳提供了充足的热源……”^[7]。

(2) 1982年福建省地震局对泉州—汕头进行了人工爆炸地震剖面研究, 廖其林等^[17]发现在该剖面厚约30 km的上地壳介质P波的平均速度为6.23 km/s, 但是在13~16 km的深处有一个低速层存在, 低速层的厚度约2.76 km, P波层速度为5.89 km/s, 并且该速度层分布稳定(图5)。他们认为该低速层可能指示在此深度范围内存在着熔融或半熔融状态的物质。

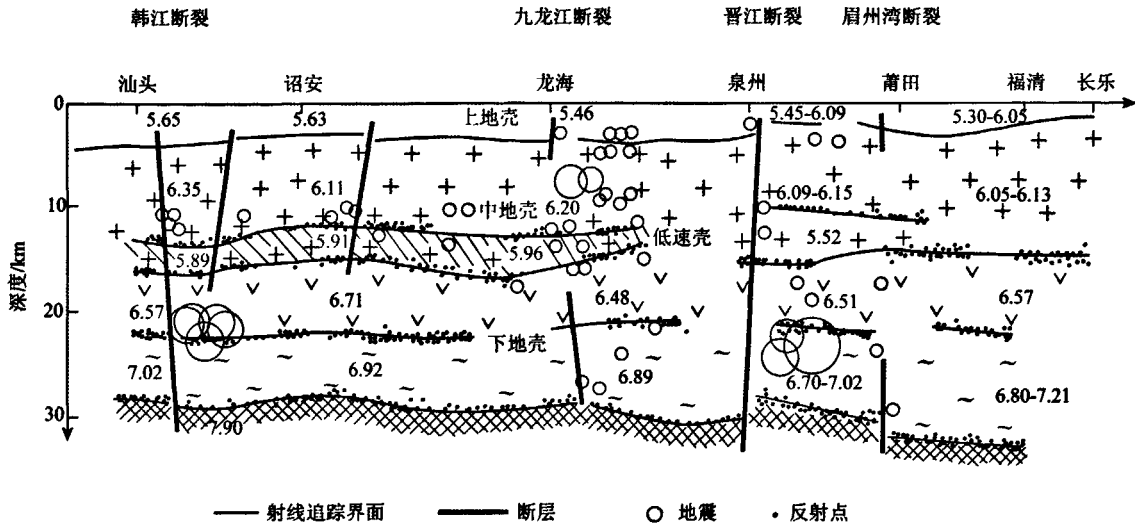
(3) 20世纪80年代中期, 中国科学院地球物理研究所熊绍柏等^[18]在福建省东南穿过漳州地热田完成了一条从云霄到安溪的地震折射剖面, 获得了该区地壳及上地幔顶部结构及速度分布图像。发现在漳州地热田上方有一个延伸不远的低速区, 速度为5.8~6.0 km/s, 埋深从10.2 km到14 km。该低速区位于一个莫霍面的转折带之上, 莫霍面由海向陆从埋深29.5 km增大为32 km。他们认为该低速区是漳州地热田的壳内热源体。

福建省出露有新生代火山岩, 它可分成东、中、西3带。东带规模最大, 分布于漳浦佛昙至龙海镇海以及流会、香山一带, 呈北东向展布, 陆地上出露面积有36 km²。岩性为拉斑玄武岩、橄榄玄武岩、碱性玄武岩。火山岩的K-Ar法同位素年龄为16.57~19.26 Ma^[19]。其主要代表是漳浦佛昙的牛头山, 已经开辟为火山公园。其实它仅为一个遭受强烈剥蚀的火山机构的根部, 火山管道明显, 但火山喷发地形早已剥蚀殆尽。用

表3 福建省活动断裂带与温泉关系统计表^[1]

Fig. 3 The relation between active faults and thermal springs in Fujian^[1]

活动断裂带	温泉数	所占百分比/%	温泉热流量/(kcal/s)	所占百分比/%	温泉年释放热流量/(10 ²¹ 尔格)	能量释放的百分率/%	合计/%
北 邵武—河源	3		153.23		0.202	0.51	
东 政和—丰顺	8	15.1	948.25	11.0	1.25	3.17	10.96
向 长乐—诏安	14		2 177.20		2.37	7.28	
闽江下游	17		1 471.69		1.94	4.92	
北 兴化湾	16		819.29		1.08	2.74	
西 永安—晋江	39	82.5	5 219.21	83.4	6.88	17.44	83.21
向 九龙江	41		13 730.79		18.10	45.89	
永定—东山	24		3 656.48		4.82	12.22	
与上述无关的	4	2.4	1 657.56	5.6	2.30		5.83
共计	166		29 833.7	39.4			100

图5 福州—泉州—汕头人工爆破地震测得的地壳构造图^[17]

(图中数字指P波层速度, 单位 km/s)

Fig. 5 Crustal structure along Fuzhou-Quanzhou-Shantou section by seismic prospecting^[17]

K-Ar 法测定的同位素年龄为 11.6 Ma, 为中新世的产物^[1]。沿海地区的玄武岩含尖晶石二辉橄榄岩包体, 包体的稀土元素配分型式为平坦型, 岩浆库位置相对较浅, 地温高, 含水丰富, 具有海洋玄武岩的特征。其喷发年代与南海海盆扩张时代相同。中带见于漳平和闽清, 规模很小, 以橄榄玄武岩为主。西带沿松溪—明溪—上杭断裂带分布, 见于明溪的雪峰、盖洋, 清流的林畲、宁化店上及泰宁邱洪。火山岩体呈孤立状散布, 共 45 个。最大者面积为 4 km², 一般 0.5 km², 总面积仅 28 km²。火山岩为拉斑玄武岩、橄榄玄武岩、碧玄岩和安山玄武岩。K-Ar 法测定的同位素年龄为 0.72 ~ 4.96 Ma。主要属上新世并延续到中更新世, 其玄武岩中含石榴石二辉橄榄岩包体, 包体的稀土元素分配型式为富集型, 岩浆来源深, 具大陆裂谷玄武岩的特征^[19]。福建省的面积为 12 万 km², 新生代火山岩的面积充其量约 500 km², 仅为全省面积的 4‰, 因此规模不大。根据玄武岩深源包体的地球化学研究, 基本不含地壳物质的混染, 玄武岩浆从岩石圈底部沿巨大的张性岩石圈断裂快速绝热上升到地表, 难以在地壳内部滞留形成岩浆囊以构成福建的地热活动的热源。相关的玄武岩墙, 对于两壁的蚀变带仅宽几厘米到十几厘米^[1]。

实际上在中国东部山东、河北、东北 3 省、内蒙古、山西, 新生代以来出现过期玄武岩喷发, 其规模远大于福建, 时代也比福建的年轻, 像五大连池在康熙年间曾有过喷发。这些玄武岩

由于粘度小, 顺断裂喷出时几乎不在地下滞留以构成地热活动的热源。所以中国东部除了吉林白头山喷出的粗面岩其下部可能存在未冷凝的岩浆囊外, 玄武岩喷出区几乎都没有温泉出露, 更不可能出现高温地热系统。

第四纪以前的岩浆侵入体的残余热量是否有可能在地表附近构成热异常呢? 福建存在许多中生代的花岗岩侵入体和中酸性火山喷发岩, 它们的地热潜力如何呢? Smith & Shaw^[20] 计算了各种规模的、侵入深度 < 10 km 的酸性侵入体的体积和冷凝时间的关系, 以此来估算其地热前景(图 6)。由图 6 可看出, 100 万年以前形成的岩浆囊, 当其体积 > 1 万 km³ 时, 其残余热还是有可能形成活动的或休眠的高温地热系统; 1 千万年前形成的岩浆囊, 只有当其体积 > 100 万 km³ 时, 其残余热才可能形成活动的或休眠的地热系统, 这种情况实际上极为罕见。1 亿年前侵位的岩浆囊, 几乎无法形成任何高热度的地热系统。福建省的岩浆侵入活动主要发生在 1 亿年前, 它们难以保持足够的热量来产生高温地热系统。

下面讨论汕头—泉州—福州人工爆破地震剖面所发现的地壳中地下 13 ~ 16 km 深处的低速层问题和云霄—安溪折射剖面埋深 10.2 ~ 14 km 的低速区问题。廖其林等认为低速层不是岩石的孔隙压力和水的的作用所引起的, 而是介质的热状态变化所致, 那里可能存在着熔融或半熔融物质^[17]。熊绍柏等认为低速区的产生有 3 种可能: 一是破碎带, 由于岩石的裂隙增多, 孔隙度加大,

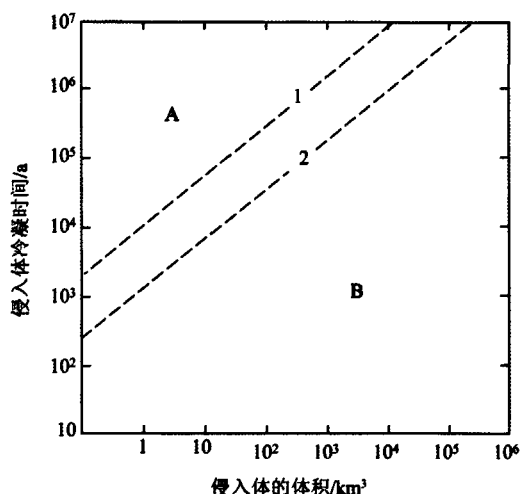


图6 侵入体的冷凝时间和地热远景^[20]

Fig. 6 Cooling intrusion of different ages and their geothermal potential

侵入体冷凝时间, 指岩浆囊中心的温度从 800 °C 降为 300 °C 所需要的年数; A 区. 无法形成地热系统; B 区. 可形成活动的或休眠的地热系统; 1. 整体冷却线; 2. 表面冷却线

可使 P 波速度减小; 二是岩石的孔隙压力、温度和含水性质发生变化, 特别是有水蒸气存在时, 会使 P 波速度降低; 三是地壳中存在部分熔融的高温物质, 使岩石体积膨胀、密度变小。熊绍柏等选择了第三种可能性。笔者则存在不同的看法, 认为: 人工爆破地震所发现的低速层, 分布是如此稳定, 它不可能是熔融或半熔融层所造成, 而是由于岩石破碎所造成, 即由闽台铲状活动断裂系或滑脱面所致^[1], 闽台低角度活动断裂系在沿海地区的埋深正好为十余公里。

1982 年 9—12 月, 周立功等^[21]在漳州沙建地区进行了微地震观测, 结果也表明, 南靖、漳州和沙建一带最大震源深度多在 5~14 km, 靠近海滨的集美附近为 15~25 km, 厦门一带为 20~30 km, 也显示出震源深度由西边的内陆向东边的海区逐渐变深的趋势。

由此可见, 天然地震资料、微震观测结果和人工爆破地震资料是十分吻合的。

1986 年至 1987 年, 中国科学院地球物理研究所和福建省地质矿产局物化探大队曾在福建省东部地区做过大地电磁测深, 发现在长乐—诏安断裂西侧的仙游、永春、南安、同安、长泰、枫亭一带, 第一层为巨厚的高阻火山岩和侵入岩, 厚度 12~35 km, 其下是部分熔融的壳内高导层, 该壳内高导层的埋深与人工爆破地震发现的低速层埋深相当。大地电磁测深结果发现在长乐—诏安

断裂的东南侧惠安、晋江、厦门、龙海一带, 特别低的表层电阻率和海相沉积物相对应; 下部为厚约 10 km、视电阻率为数十欧姆·米的第二层, 孔祥儒等认为可能是破碎的洋壳, 它们曾经是大陆架或洋底, 后来仰冲到陆缘之上, 因此推测长乐—诏安断裂可能是古大陆和海洋的分界^[22]。

根据上面的资料, 福建省不存在晚更新世和全新世的玄武岩大规模喷发, 即使有, 也不可能在地下滞留成为岩浆囊; 新近纪喷出的玄武岩规模很小, 以充填张性断裂为主, 不可能滞留地下, 构成地热活动的热源。中生代的花岗岩规模巨大但早已冷却, 也不能构成福建地热活动的热源; 中地壳中的低速高导层未必是熔融或半熔融体, 而可能只是闽台铲状断层的滑脱面。

5 福建地壳的热结构

1985 年王钧^[23]利用当时可以收集到的钻孔测温数据, 加上利用二氧化硅地球化学温度计推算的温度值, 计算了东南沿海地区 (包括福建省) 1 000 m 和 2 000 m 深度的地温数值, 在 1 000 m 深处, 福建西部为 40 °C 左右, 而福建东部可超过 50 °C; 在 2 000 m 深处, 福建西部为 60~70 °C, 福建东部为 70~80 °C。据此推算了福建的地温梯度, 福建东部为 3.0~4.0 °C/100 m; 福建西部为 2.5~3.0/100 m。

1987 年至 1988 年, 中国科学院地质研究所与福建省地质矿产局合作在福建省开展了系统的大地热流测试和研究工作, 至 1993 年共公布热流值数据 41 个 (含热异常区 5 个), 平均热流值 (80.78 ± 33.93) mW/m², 排除 5 个热异常区后, 平均热流值为 (69.78 ± 10.62) mW/m²^[24]。其中闽西地区热流值 29 个, 平均热流值为 74 mW/m², 认为“相当于中—新生代活动区的热流值”^[25]。在闽东南漳州盆地的背景热流值为 73 mW/m², 热田区的异常热流值为 359 mW/m²^[4], 1990 年汪集旻等公布的数据为 209 mW/m²。福州盆地的大地热流值 1990 年公布的为 86.1 mW/m²^[26]; 2001 年公布的为 220.7 mW/m²^[27]。前者的经纬度为 119°20'E, 25°52'N; 后者为 119°18'E, 25°05'N。另外, 靠海滨的一些测点的大地热流值都比较低, 如: 福清 (53.8 mW/m²)、厦门 (45.5 mW/m²)、泉州 (49.9 mW/m²)。

因为地下水中二氧化硅达到平衡状态时的温度与实测热流值之间存在线性关系, Swanberg 和

Morgan 于 1978 年提出了硅热流方法。1986 年万天丰等^[28]利用计算出的硅热流值计算了福建省 20 个 1:20 万区域地质测量图幅(1° × 40′)的硅热流值。平均每个图幅内均有 30 ~ 80 个数据, 少数图幅的数据可超过 100 个, 共有数据 1 269 个。计算结果见表 4 与图 7。

根据地表热流值(q_0)和地表附近恒温层的温度(t_0 , 福建取 19 °C), 再加上侵入岩的岩石生热率(A_0)、岩石热导率(K)以及放射性元素富集层的厚度(D), 可以计算岩石圈某一深度的温度。如果岩石生热率(A)以指数形式随深度而变小, $A(Z) = A_0 \exp(-Z/D)$, 岩石热导率(K)在一定深度范围内为定值, 则岩石圈内不同深度(Z)的温度值可按式求得^[12]:

$$t(Z) = t_0 + (q_0 - A_0 D) Z / K + A_0 D^2 [1 - \exp(-Z/D)] / K \quad (1)$$

式(1)中: 岩石生热率可以根据福建省侵入岩中铀、钍、钾的含量, 用下式求得:

$$A = 10^{-5} \rho (9.52 c_U + 2.56 c_{Th} + 3.48 c_K) \quad (2)$$

式(2)中: A 为岩石生热率, $\mu W/m^3$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; c_U 为岩石中铀的含量, 单位为 10^{-6} ; c_{Th} 为岩石中钍的含量, 单位为 10^{-6} ; c_K 为岩石中钾的含量, 单位为 %。

福建省的地壳在东部主要是在中生代形成, 西部是在古生代形成的。在选取岩石中铀、钍、钾含量时, 东部取中生代花岗岩的平均值, 西部取古生代花岗岩的平均值, 计算结果见表 5。

Jaupert 等^[29]发现, Th/U 比的平均值大致与 D 值呈线性关系, Th/U 比越大, D 值越小。据此估计出福建东部的 D 值约为 10 km, 西部的 D 值约为 9 km。

对于岩石热导率值, 根据国外的经验, 结合福

表 4 福建省二氧化硅温度计温度和硅热流值^[28]

Fig. 4 The temperature of silica geothermometer and silica heat flow values of Fujian^[28]

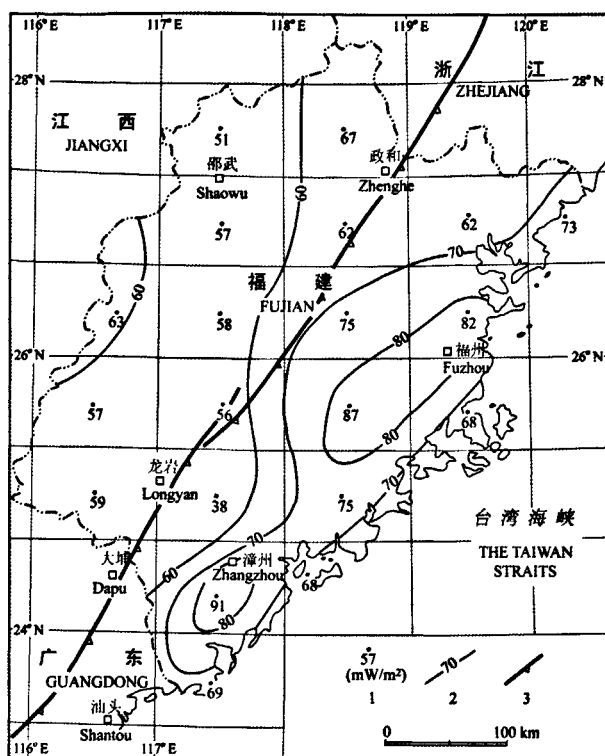
序号	图幅名称	样品个数	$t(SiO_2)/^{\circ}C$	标准偏差	硅热流值/ (mW/m^2)	图幅经纬度	
						E	N
1	光泽	61	53.87	20.42	50.96	117° ~ 118°	27 20° ~ 28 00°
2	浦城	64	64.59	16.51	66.72	118° ~ 119°	27 20° ~ 28 00°
3	顺昌	113	57.98	15.57	57.00	117° ~ 118°	26 40° ~ 27 20°
4	建瓯	33	61.28	11.99	61.85	118° ~ 119°	26 40° ~ 27 20°
5	福安	60	61.37	18.37	61.98	119° ~ 120°	26 40° ~ 27 20°
6	三沙	32	68.78	22.38	72.88	120° ~ 121°	26 40° ~ 27 20°
7	宁化	32	61.80	(25.77)	62.62	116° ~ 117°	26 00° ~ 26 40°
8	三明	84	58.68	(27.13)	58.03	117° ~ 118°	26 00° ~ 26 40°
9	南平	51	69.90	24.16	74.58	118° ~ 119°	26 00° ~ 26 40°
10	福州	109	74.99	24.13	82.01	119° ~ 120°	26 00° ~ 26 40°
11	长汀	115	58.05	(31.62)	57.10	116° ~ 117°	25 20° ~ 26 00°
12	永安	106	57.31	(31.97)	56.01	117° ~ 118°	25 20° ~ 26 00°
13	德化	69	78.14	(30.64)	86.65	118° ~ 119°	25 20° ~ 26 00°
14	福清	83	85.68	23.01	68.32	119° ~ 120°	25 20° ~ 26 00°
15	上杭	89	53.69	(30.18)	58.69	116° ~ 117°	24 40° ~ 25 20°
16	龙岩	33	45.02	22.26	37.94	117° ~ 118°	24 40° ~ 25 20°
17	泉州	33	69.95	20.50	74.60	118° ~ 119°	24 40° ~ 25 20°
18	漳州	52	81.02	24.03	90.88	117° ~ 118°	24 00° ~ 24 40°
19	厦门	29	65.66	19.31	68.29	118° ~ 119°	24 00° ~ 24 40°
20	东山	21	66.13	(27.11)	68.98	117° ~ 118°	23 20° ~ 24 00°

注: 表中标准偏差大于 25 °C 者(有括弧), 硅热流值的可信度差; 表中图幅的经纬度由笔者添加。

表 5 福建省侵入岩铀、钍、钾含量和岩石生热率^[26]

Table 5 The contents of U, Th and K and the heat production of igneous rocks in Fujian

地区	侵入岩年代	样品数	$c_U/10^{-6}$	$c_{Th}/10^{-6}$	$c_K/\%$	c_{Th}/c_U	岩石生热率/($\mu W/m^3$)
福建东部	中生代	235	6.73	26.76	4.66	3.976	3.943
福建西部	古生代	19	4.69	21.69	4.905	4.625	3.107

图7 福建省硅热流值图^[28]Fig. 7 Silica heat flow of Fujian Province^[28]

1. 图幅内硅热流平均值/(mW/m²); 2. 硅热流等值线/(mW/m²);
3. 活动逆掩断层

建的具体情况, 上地壳(0~10 km)的岩石热导率按2116块花岗岩试样的平均值, 取为3.0 W/(m·K), 下地壳参照角闪岩的数值, 取为3.4 W/(m·K); 上地幔(35 km以下)参照深变质岩的测试数据, 取值为3.58 W/(m·K)。

根据上面的有关数值代入(1)式, 可以求得福建省东部和西部70 km以上深部的温度。在计算过程中笔者在选取热流值 q_0 时, 舍弃实测的热流值而采用硅热流值, 理由是: (1)以漳州所公布的3个热流值数据为例, 代入公式(1), 当 q_0 值取73 mW/m²时, 5 km深处的温度仅132℃; 若 q_0 值取209 mW/m²时, 5 km深处的温度为381℃, 已经超过了水的临界温度; 如果 q_0 值取359 mW/m²时, 则5 km深处的温度达631℃, 已经是形成花岗岩浆的温度了, 与实际情况不符。(2)在中—新生代, 福建东部的构造活动明显比西部强烈, 但是西部的热流值却高于东部沿海地区, 不大合理。(3)用硅热流值算得的居里点的深度与航空磁测所得的结果非常吻合。(4)硅热流值所采集的数据是以一个面作基础的, 可能更好地显示图幅区域的特点。所以在计算福建省深部的地壳的温度时,

q_0 值选用了硅热流值。计算结果见表6和表7。

在深部地温的研究中, 20世纪80年代地质矿产部航空物探研究所根据航空磁测的资料来计算地下居里点的埋深。所谓居里点指的是地下物质的磁性消失点, 温度为560℃。在福建省东部漳州、德化、福州一带居里点深度<32 km。其结果与万天丰等^[1]用硅热流值计算的地下温度的结果是基本吻合的。在福建东部地区, 居里点埋深在40 km以下的有三沙、南平、泉州等地区; 接近50 km的有东山、厦门和福清。在福建西部居里点的埋深达到50~60 km。但是, 有人认为: 漳州盆地、福州盆地的低速层分布隆起区和莫霍面隆起区也是居里面分布隆起区。漳州盆地和福州盆地居里面埋深约10 km^[31]。这与万天丰等计算结果相差悬殊。如果漳州和福州居里面真的埋深只有10 km, 那就与美国黄石公园的7.5~8.5 km相近^[30]。可是, 从地热显示的外观上, 断裂发育的福建完全不见黄石公园的大面积的水热爆炸、众多间歇喷泉、遍地硅华和区域性的酸性蚀变的景象。

国际地热界一般公认: 如果在10 km以内深处形成中酸性岩浆侵入体时, 常常可以构成有经济价值的高温地热系统。居里点的温度略低于花岗岩浆形成的温度。因此在漳州30 km以下的深处可能有花岗岩浆形成, 而在德化与福州形成岩浆要在35~40 km深度。因此, 在福建省10 km深处完全不具备形成花岗岩浆的温度条件。在该深度上, 温度最高的漳州也仅为309℃。

至于11~18 km深度的人工爆破地震所发现的低速层和地震的低Q层以及MT测得的高导层, 廖其林认为是融熔和半融熔的物质, 看来其推断是有问题的。形成低速高导层经常是由于岩石较破碎、含水量较多或含碳量较高所致, 而并不一定都是融熔和半融熔的物质所致。从该剖面的低速高导层没有横波被吸收的情况来看, 融熔和半融熔的物质是不可能存在的。在漳州低速层的埋深仅11 km, 其温度超过309℃, 在漳州15 km深处的温度刚刚达到水的临界温度。上述各点都否定了在福建省地壳上部形成岩浆热源的可能性。

至于5 km深处热储温度达到250℃的地方, 在福建还没有发现。5 km深处温度最高的在漳州, 其温度为195℃。在福建东部该深处的温度可达150℃(仅福安幅为146℃); 而闽西地区都在130℃左右。

表 6 福建省西部地区深部温度估算值^[30]Table 6 Temperature estimates in the depth of western Fujian^[30]

深度/km	光泽/℃	浦城/℃	顺昌/℃	建瓯/℃	宁化/℃	三明/℃	长汀/℃	永安/℃	上杭/℃	龙岩/℃
1	45	51	48	49	49	48	48	47	48	41
3	87	103	93	98	99	94	93	92	95	74
5	118	144	128	136	137	130	128	126	131	96
10	173	226	193	209	212	197	194	190	199	130
15	193	262	220	241	244	224	220	215	227	135
20	228	321	263	292	296	269	264	258	273	151
25	262	371	302	342	348	314	307	299	319	166
30	296	435	349	392	399	358	350	340	364	181
40	350	522	414	468	477	425	415	403	433	201
50	410	631	495	563	573	509	496	481	518	229
60	475	739	576	657	670	593	580	559	604	256
70	539	847	657	752	767	677	659	638	690	284

表 7 福建省东部地区深部温度估算值^[30]Table 7 Temperature estimates in the depth of eastern Fujian^[30]

深度/km	福安/℃	三沙/℃	南平/℃	福州/℃	德化/℃	福清/℃	泉州/℃	漳州/℃	厦门/℃	东山/℃
1	54	57	58	60	62	56	58	63	56	56
3	197	118	120	127	132	113	120	136	113	114
5	146	165	167	180	188	157	167	195	157	158
10	212	249	254	279	295	234	255	309	233	236
15	246	294	301	334	355	274	301	373	274	277
20	282	346	356	400	427	319	356	452	319	323
25	316	396	408	463	497	362	409	528	362	367
30	349	445	460	526	567	405	461	604	405	411
40	402	524	543	626	659	473	543	725	473	481
50	465	618	641	745	810	554	642	869	554	563
60	528	711	739	864	942	635	740	1 012	634	645
70	591	804	837	983	1 074	715	838	1 156	715	728

6 结 语

从福建省地壳的热结构的研究来看,地壳上部不可能出现岩浆热源的温度条件。这是受福建地质构造条件所决定的,因为福建不是两个板块汇聚带的仰冲盘。在洋陆汇聚的岛弧地区,只有仰冲盘才能出现大规模的岩浆活动。根据 Ringwood 的研究^[33],岛弧岩浆岩的发育经历两个阶段。早期俯冲洋壳的角闪岩在 70 ~ 100 km 深处脱水,产生的水引起贝尼奥夫带之上的地幔楔的部分熔融,形成岩浆房,经分异产生拉斑玄武岩系列;当进一步俯冲到 100 ~ 150 km 时,蛇纹石脱水,石英榴辉岩的洋壳部分熔融,产生流纹-英安岩岩浆,它和上覆的地幔的上地幔岩反应形成辉岩,辉岩的底辟上升和部分熔融产生岩浆,岩浆在 80 ~ 150 km 深处通过榴辉岩结晶和角闪岩在

30 ~ 100 km 深处结晶分异,产生钙碱性系列岩浆岩。这两个过程都是在高水蒸气压力下产生的。这些过程在新生代时期的福建是不可能出现的。这就决定了福建省境内不可能形成有岩浆热源的高温水热对流系统①型。另外,由于福建地区自新近纪以来受到菲律宾大洋板块来自东南的强烈挤压,使相对脆性的、固结的闽台地区陆壳产生铲状断层系统,断裂网格发育,使丰沛的大气水渗入地下深处,吸收岩石中的热量,由于水头压力差和密度差,地下水可沿断裂,特别是北西向张剪性断裂,排出地表或储存于地表附近,构成大量深循环水热对流系统②型。它们主要是低温和中温的温水储,当循环深度大时也可以形成高温的热水系统。

致谢:本文在写作过程中得到中国地质大学(北京)万天丰教授的帮助,在此表示深切的谢意。

参考文献:

- [1] 万天丰, 褚明记. 闽台铲状活动断裂 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1987, 12(1): 21-29.
- [2] 庄庆祥. 漳州热田成因模式探讨 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1988, 13(3): 335-339.
- [3] 韩庆之, 庄庆祥. 漳州盆地地下热水的来源和运移途径的初步研究 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1988, 13(3): 271-277.
- [4] 汪集旻, 庞忠和, 熊亮萍, 等. 漳州盆地水热系统的成因分析 [M] // 任湘. 第三次全国地热学术会议论文选集. 北京: 北京科学技术出版社, 1989: 116-122.
- [5] 陈墨香, 汪集旻, 邓孝. 中国地热资源——形成特点和潜力评估 [M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-260.
- [6] 赵云华, 赵亮亮. 福建省地热能发展规划设想 [J]. 能源与环境, 2010(增刊): 10-14.
- [7] 庄庆祥. 福建地热研究与实践 [M]. 北京: 地质出版社, 2010: 1-201.
- [8] 廖志杰. 中国低碳地热发电的回顾与展望 [J]. 自然杂志, 2011, 33(2): 86-92.
- [9] Ho C S. A synthesis of the geologic evolution of Taiwan [J]. Tectonophysics, 1986, 125(1/3): 1-16.
- [10] Tsai Y B. Seismotectonics of Taiwan [J]. Tectonophysics, 1986, 125(1/3): 18-38.
- [11] 河北省地质局水文地质四大队. 水文地质手册 [M]. 北京: 地质出版社, 1978: 1-856.
- [12] Rybach L, Muffler L J P. Geothermal Systems, Principles and Case Histories [M]. Chichester, New York, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, 1981: 1-359.
- [13] Muffler L J P. Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources [M] // Proceedings of the Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources. Washington D. C.: Government Printing Office, 1976: 499-507.
- [14] White D E, Muffler L J P, Truesdell A H. Vapor-dominated hydrothermal systems compared with hot water systems [J]. Economic Geology, 1971, 66: 75-97.
- [15] Kappelmeyer O, Haenel R. Geothermics with Special Reference to Application [M]. Berlin, Stuttgart: Gebruder Borntraeger, 1974: 1-238.
- [16] Stern T A. A back-arc basin formed within continental lithosphere: The central volcanic region of New Zealand [J]. Tectonophysics, 1985, 112: 385-409.
- [17] 廖其林, 王振明, 王屏路, 等. 福州—泉州—汕头地区地壳结构的爆炸地震研究 [J]. 地球物理学报, 1988, 31(3): 270-280.
- [18] 熊绍柏, 金东敏, 孙克忠, 等. 福建漳州地热田及其邻近地区的地壳深部构造特征 [J]. 地球物理学报, 1991, 34(1): 55-63.
- [19] 陈道公, 张剑波. 福建龙海明溪两区玄武质火山岩钾-氩年龄和 Nd、Sr、Pb 同位素 [J]. 岩石学报, 1992, 8(4): 324-334.
- [20] Smith R L, Shaw H R. Igneous-related geothermal systems [M] // White D E, Williams D L. Assessment of Geothermal Resources of the United States—1975. U. S. Geological Survey Circular 726, 1975: 58-83.
- [21] 周立功, 刘汉俊, 褚志贤, 等. 闽南漳州沙建温泉区的微震观测 [J]. 地球物理学报, 1989, 32(2): 178-190.
- [22] 孔祥儒, 刘士杰, 张建军, 等. 福建东部地区大地电磁测深研究 [J]. 地球物理学报, 1991, 34(6): 724-735.
- [23] 王钧. 东南沿海地区地温场的形成及其分布规律 [J]. 地震地质, 1985, 7(1): 49-58.
- [24] 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旻, 等. 福建省西部大地热流值 [J]. 地质科学, 1993, 28(1): 96-101.
- [25] 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旻. 中国东南地区实测热流值 [J]. 地球物理学报, 1993, 36(6): 784-790.
- [26] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版) [J]. 地震地质, 1990, 12(4): 351-365.
- [27] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版) [J]. 地球物理学报, 2001, 44(5): 611-626.
- [28] Wan Tianfeng, Tong Yongfu. Silica geothermometry estimates of heat flow in the Fujian Province (P. R. China) [M] // Proceeding of 8th New Zealand Geothermal Workshop, 1986: 195-197.
- [29] Jaupart C, Sclater J G, Simmons G. Heat flow studies: Constraints on the distribution of uranium, thorium and potassium in the continental crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1981, 52: 328-344.
- [30] 万天丰, 褚明记, 陈明佑. 福建省岩石圈的热状态与地热资源的远景评价 [J]. 地质学报, 1988, 62(2): 178-188.
- [31] 魏斯禹, 刘绍成, 敖光华, 等. 我国福建陆缘地带的地热活动与地球物理场特征 [J]. 西北地震学报, 1988, 10(3): 74-81.
- [32] Bhallacharyya B K, Leu Lei-kuang. Analysis of magnetic anomalies over Yellowstone National Park—mapping of Curie point isothermal for geothermal reconnaissance [J]. Journal of Geophysical Research, 1975, 80(32): 4461-4465.
- [33] Ringwood A E. The petrological evolution of island arc system [J]. Journal of Geological Society of London, 1974, 130(3): 183-204.