

福建地热地球物理研究

中国科学院地球物理研究所 编著
福建省地质矿产局

中国科学技术出版社

前 言

1973年世界石油危机以后,很多国家都在考虑今后的能源问题。目前,世界上对能源的需求量每年增加6%,而且逐年上升。1980年世界能耗的97%为石油和煤,3%为水力、核能及地热。如以1980年的开采速率估算,目前世界已探明的煤和石油的储量仅够开采130年。所以,地热发电,特别是干热岩发电正日益受到国际上的重视。现在,世界上有66个国家在从事地热研究和开发,我国也应重视地热的研究和开发利用。140℃以下的水用处是很广泛的,如果北京、天津能广泛地综合利用地下热水,不仅可部分地解决居民的取暖、冬季蔬菜温室等问题,也可减少煤、电的用量,节约的能源可投入轻、重工业建设。在我国,不仅西藏、云南、台湾,而且福建、广东、浙江等省都有地温梯度较大(大于3℃/100m)的地热异常区。所以,我国的地热事业的发展是很有希望的。按现代技术,利用140℃以上的有足够流量的热水发电可取得较好的经济效益。1978年前后,世界地热发电量每年增长14.32%,现在这个速度还在增加。估计到2000年,全世界地热发电量可达到6400万千瓦。另外,美国、德国、英国、法国等国家还在研究干热岩发电。世界干热岩的热储量不仅比含热水层的热储量大许多,也比煤、石油的总储量大许多。据美国资料,地热梯度大于4℃/100m的干热岩地区,深度10km内储蓄的能量约为1980年世界消耗的总能量的1000倍。所以,如能把它开发出来,这是一个巨大的能源。我国利用干热岩发电的条件还是有的,因为打4km深的钻孔是可能的。另外,用水破裂法搞人工水热系统形成一个含水层也能做到。

福建是我国富饶省份之一。福建的“四化”建设需要大量能源,但福建的煤储量很少,要从山西运进;目前还没有找到石油资源。福建虽有一批水力发电站,但发电量还不能满足需要。尤其是在冬、春两季,由于水力不足,发电量更少,有的地方不得不拉闸限电,严重影响了福建的工农业等国民经济建设的进一步发展。然而,福建地热资源较为丰富,现在已发现热水点192处,最高水温在漳州,达120℃,福州达105℃,德化南堰达89℃等。85%的温泉分布在花岗岩地区,并且集中在沿海一带,这对福建的建设和开放极其有利。一方面要重视140℃以下的地热的开发和综合利用;另一方面要研究能否找到温度超过150℃可用于发电的深部地热资源问题,这是福建省领导和人民非常关心的问题。本书从地球板块动力学理论出发,认为中国板块与菲律宾板块挤压碰撞可影响闽、浙等中国东南大陆边缘。碰撞的主压力方向为NW向,这使NW向断裂为张性或张扭性,成为地下热水的良好通道,而与其垂直的NE向大断裂属压性或压扭性。两个方向断裂的交汇部位通道发育,温泉增多。随着板块的碰撞、挤压、推移和构造应力作用,地下可能存在破碎带或破碎层,这些是地下热水的良好通道和储集区。另外,东南沿海和台湾海峡可能存在小地幔对流环,在福建沿海和台湾海峡上升,致使澎湖列岛有上新世至更新世的玄武岩。地幔物质上升意味着热量上升,在漳州已发现120℃的高温钻孔。因此,福建地区,特别是闽东南地区2~3km深处有可能找到150~180℃的高温蒸气热水供发电使用。如何找到高温蒸气热水呢?在深部及地热资料较少的福建,更需要作深部及地热地球物理勘探工作,以使用实

测地球物理及地热资料对福建地热资源作出科学论断。为此，在1985年3月7日由中国科学院地球物理研究所牵头，与地矿部福建地质矿产局合作，联合起草了“我国福建地区地热能源与矿产资源的地球物理探测”项目建议报告。1986年3月由国家科委组织了项目论证会议，会后，国家科委、中国科学院及福建省人民政府对这一科研项目表示大力支持，联合资助了福建地热地球物理探测项目的第一期工程的科研费用，开设了以下研究课题：

1. 福建地热区的区域地球物理场特征；
2. 福建地区重力场特征、地壳厚度与地热能关系的研究；
3. 福建省地磁场的主要特征及其成因；
4. 福建省磁性地壳的研究；
5. 福建沿海地区深部电性特征及其与地热资源的关系；
6. 福建地热区地壳深部构造的爆炸地震学研究；
7. 福州市地热回灌区的直流电法勘探；
8. 漳州地热区的地震波速异常和Q值分布；
9. 福建地热区的红外遥感研究；
10. 福建沿海地区地温场研究；
11. 漳州及福州热田数值模拟研究；
12. 福州地热田土壤地球化学和浅层测温研究。

通过1985年下半年、1986~1987年两年多时间，对以上12个专题进行了野外观测研究和1988年~1989年4月的室内资料处理以及专题研究得出的初步结果，我们汇总成“福建地区地热能源与矿产资源地球物理探测”的第一阶段工作成果（汇报稿）。1989年4月由福建省科委邀请有关地质、地球物理、水文及地热方面的专家、教授在福州举行了成果汇报及评议会议。会上，专家们肯定了本项目第一阶段取得的很有意义的重要成果：

1. 福州和漳州热田区地幔上隆，在漳州存在壳内低速体，可能是高温岩体；
2. 多种探测方法均进一步证实，湄洲湾—将乐一带是深断裂带，其深部是福建省南北的重要构造分界带；
3. 人工地震研究发现，沙建至漳平之间莫霍界面断陷达4km；
4. 推断闽江断裂和九龙江断裂是重要的深部控热构造带；
5. 大地电磁测量发现，惠安至龙海一带地壳上部10km具有海洋地壳的电性特征；
6. 福建和漳州地区多种地球物理和地球化学研究结果与地热异常和温泉分布有很好的对应关系；
7. 上述研究还圈定了一些新的异常区，是有希望的地热远景区；
8. 指出漳州热田区地下2.5km左右有150℃高温热水的远景区。

会后，根据专家们提出的建议，对本项目研究成果的汇报稿又进行了修改和补充，最后编写成本书——《福建地热地球物理研究》。本书将会对福建省的地热开发和地球物理研究起到重要的作用。

本书是有关科研人员集体劳动的科研成果，主要执笔者为：

前言 **陈宗基**；第一章 **陈宗基**、熊绍柏、欧阳琨；第二章 刘元龙、周文虎、祝恒宾；第三章 任国泰；第四章 敖光华、刘长风；第五章 孔祥儒；第六章 熊绍柏

第七章 石昆法；第八章 孙克忠；第九章 葛碧如；第十章 欧阳斌、苏志文；第十一章 钟时杰、徐文跃；第十二章 徐文跃、钟时杰；第十三章 夏春金、王根建；第十四章 吴建中、黄刚毅；第十五章 魏克勤；第十六章 陈宗基、孔祥儒、周文虎、熊绍柏、刘元龙、刘绍成、敖光华、全志翰。

本书由陈宗基、孔祥儒、周文虎、熊绍柏、刘元龙统稿完成。

此研究项目得到了国家科委、中国科学院、福建省领导及有关部门的支持和关心；项目的完成和本书的出版还得到福建省科委、中国科学院地球物理研究所和福建省地质矿产局有关领导和许多同志的支持、关心和帮助，在此一并致谢。

目 录

第一章	福建省地热资源的地球物理和地质研究	(1)
§ 1	引言	(1)
§ 2	构造与地质条件	(2)
§ 3	地热调查	(4)
§ 4	爆炸地震勘探	(4)
§ 5	分析、结论和建议	(6)
第二章	福建地区重力场特征、地壳厚度与地热能关系的研究	(15)
§ 1	引言	(15)
§ 2	福建地区的重力场特征	(15)
§ 3	福建地区的地壳构造特征	(17)
§ 4	福州地区重力异常特征及地热研究	(20)
§ 5	贵安盆地的重力异常与地热	(27)
§ 6	漳州盆地重力场特征、地质构造与温泉关系的探讨	(31)
第三章	福建地热资源与地磁场区域、局部异常	(39)
§ 1	福建地下热水资源概况	(39)
§ 2	福建省温泉热源及地下热水形成机制的研究	(39)
§ 3	关于福建省地下热水资源远景区的研究	(42)
§ 4	利用局部磁异常资料对漳州地热田的研究	(43)
第四章	福建省磁性地壳的研究	(48)
§ 1	计算方法与原理	(48)
§ 2	福州和漳州地区的居里深度	(55)
§ 3	推断与解释	(65)
§ 4	磁性棱柱体的尺度与深度的关系	(69)
§ 5	结束语	(73)
第五章	福建东部地区大地电磁测深研究	(75)
§ 1	引言	(75)
§ 2	MT方法的基本原理及主要特点	(77)
§ 3	仪器和野外工作方法	(78)
§ 4	MT资料的室内处理	(79)
§ 5	成果解释	(90)
第六章	福建地热区地壳深部构造的爆炸地震学研究	(94)
§ 1	引言	(94)
§ 2	爆炸地震野外试验	(95)
§ 3	资料处理	(99)

§ 4	地震波场及震相特征	(104)
§ 5	一维解释与研究	(108)
§ 6	二维结构的研究	(115)
§ 7	讨论	(122)
第七章	福州市地热回灌区直流电法勘探	(127)
§ 1	引言	(127)
§ 2	福州热田的地球物理特征及野外工作布置	(127)
§ 3	野外工作方法与技术	(129)
§ 4	资料分析方法及结果	(130)
§ 5	福州热田的视电阻率分布及断裂构造	(137)
§ 6	视电阻率反演结果及其地质意义	(138)
§ 7	结论	(140)
第八章	福建省漳州地热区的地震波速异常及云霄——安溪地区的浅层Q值分布	(141)
§ 1	当前的研究现状	(141)
§ 2	漳州地热区的微震台网观测	(142)
§ 3	云霄——安溪测线的浅层Q值分布	(149)
§ 4	几点看法	(152)
第九章	福建东南部地热的热红外遥感分析	(160)
§ 1	引言	(160)
§ 2	遥感资料的选取与处理	(161)
§ 3	地热热岛	(163)
§ 4	热岛分布与地质构造	(164)
第十章	福建地热勘察研究	(166)
§ 1	地热的基本概念	(166)
§ 2	测温仪器	(167)
§ 3	福建大地热流野外测量	(169)
§ 4	地温资料的改善	(179)
§ 5	热源分析	(190)
第十一章	漳州地热田温度场的数值模拟及热田成因初探	(196)
§ 1	引言	(196)
§ 2	漳州地热田及漳州盆地温度场的模拟	(198)
§ 3	模型MB-160的一些推论	(208)
§ 4	结论与讨论	(209)
§ 5	对漳州地热田的评价	(210)
第十二章	福州地热田的数值模拟及地下水热系统稳态模型的建立与应用	(216)
§ 1	引言	(216)
§ 2	模型的建立	(219)
§ 3	有限元分析	(221)

§ 4	数值计算方法与程序设计及典型例题的计算结果	(221)
§ 5	福州地热田的数值模拟	(223)
§ 6	方法的不足与改进	(227)
第十三章	福建省福州地热田土壤地球化学勘查与研究	(234)
§ 1	引言	(234)
§ 2	地质、地球化学特征	(234)
§ 3	土壤地球化学异常的圈定和评价	(244)
§ 4	几点看法	(249)
第十四章	福州热田浅层测温研究	(250)
§ 1	引言	(250)
§ 2	福州热田测温工作概述	(250)
§ 3	区域地质构造简介	(251)
§ 4	福州热田地温场特征及解释	(251)
§ 5	福州热田远景初步评价	(258)
第十五章	福州地热田人工补给回灌试验	(261)
§ 1	1975年回灌试验情况	(261)
§ 2	1988年回灌试验内容及示踪剂选择	(262)
§ 3	回灌试验初步结果	(262)
第十六章	讨论、结论和建议	(268)
§ 1	福建地热的热源模式	(268)
§ 2	福建省东部地壳构造研究的新成果	(269)
§ 3	结论和建议	(271)

CONTENTS

Capt. 1	Geophysical and Geological Investigations of the Geothermal Resources in Fujian Province.....	(9)
Capt. 2	A Study of Gravity Anomaly Features, Crustal Thickness and Their Relations to Geothermal Energy of Fujian	(38)
Capt. 3	A Study on Geothermal Resources and Geomagnetic Anomalies in Fujian Province.....	(46)
Capt. 4	A Study on the Magnetic Crust of Fujian Province.....	(73)
Capt. 5	Magnetotelluric Sounding Studies in the Eastern Area of Fujian Province.....	(93)
Capt. 6	Explosional Seismology Study for Deep Crustal Structure of the Geothermal Region in Fujian Province.....	(125)
Capt. 7	Exploration of the Fuzhou Geothermal Recharge Area by the Direct Current Method	(140)
Capt. 8	Seismic Velocity Anomaly in Zhangzhou Geothermal Area and Shallow Q Value Distribution in Yunxiao—Anxi of Fujian Province	(159)
Capt. 9	Remote Sensing Analysis of Thermal Infrared for Geotherm in Southeastern Fujian	(165)
Capt. 10	Research on the Geotemperature Field in the Fujian Province	(194)
Capt. 11	Numerical Modelling of the Zhangzhou Geothermal Field, Fujian Province, and Study of Its Heat Source	(215)
Capt. 12	The Hydrothermal System of Fuzhou Geothermal Field, China.....	(233)
Capt. 13	Soil Geochemistry Exploration of the Fuzhou Geothermal Field in Fujian Province.....	(249)
Capt. 14	A Research on the Shallow Thermometry in Fuzhou Geothermal Field	(260)
Capt. 15	The Artificial Recharge Test of Fujian Geothermal Fields Environmental Isotope Tracing Studies.....	(267)

第一章 福建省地热资源的地球物理和地质研究

本章主要论述构造研究、地热调查及若干地震剖面方面的工作。作者认为，福建地区特殊的地热活动是由于位于29km深处的异常上地幔、部分熔融且具有裂隙的侵入块体以及含放射性物质的花岗岩体引起的。深断层尤其是断层交汇区的曲折通道提供了热物质向上流动的有利条件。含裂隙断裂带、尤其是交汇区域促进了水循环。本章还提出了若干工程地质研究方法。

§ 1 引 言

福建省的经济发展极需能源，由于从其他省运输煤炭和石油需花费大量资金，因此非常希望勘探和开发自己的各种自然资源。

福建省是华南褶皱系和变质区的一部分，位于环太平洋火山带西段的外带。该地区自加里东期以来，构造活动极为强烈。在三叠纪时期，太平洋—欧亚板块的俯冲导致了福建省东部大规模的褶皱和断裂作用，这对多种侵入体、尤其是花岗岩侵入体、岩基、火山岩的现代分布图像及多次侵位起着决定性的作用。如同后面将要讨论的那样，他们是形成福建地热的基本因素。

地热显示主要分布在北纬 $26^{\circ}40'$ 以南，平行于从福州经广东至广西的沿海活动断裂带。

该区多数温泉的地表温度超过 55°C ，平均地温梯度约 $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ，平均热流 $160\text{mW}/\text{m}^2$ ，分别高于全球平均值 $26\sim 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $60\text{mW}/\text{m}^2$ 。多年来这些资源偶有开发。为从总体上研究全省的地热潜能以及有效而经济地开发的可行性，由陈宗基教授牵头，中国科学院地球物理研究所与福建省地质矿产局合作进行了大规模研究，目的在于分析温度场、地球物理场、地壳构造、水循环以及地质条件之间的相互关系，并在此基础上探讨地热的成因。我们的目的是双重的：第一是寻找潜在的低温热资源便于直接开采；第二是探索未来开发位于大约 $2\sim 3\text{km}$ 深处干热岩热资源在经济上和技术上的可行性。英国也正在进行类似的研究⁽¹⁾。

我们应用爆炸地震学、地磁和微重力测量对构造进行研究。福建地热的研究目前正处于发现新的潜在热源并评价其经济上的可行性及其在工业、园林工程、农业、水产养殖及旅游业等诸方面利用的阶段。

本章介绍了我们的一部分主要研究结果，并且特别将注意力放在具有良好直接开采前景的漳州盆地的地热状况方面。

§ 2 构造与地质条件*

福建省是华南褶皱系的一部分，自晚三叠世以来成为环太平洋大陆边缘的一部分。

根据以下沉积特征、褶皱带、断裂系统、岩浆活动以及变质作用等方面的资料，可以把福建划分为3个一极构造单元⁽²⁾：闽西北褶皱上升区W1；闽西南华力西—印支断裂拗陷带W2；以及被政和—大埔断裂带所分割的闽东火山—断褶带E（图1-1）。在西部构造单元内

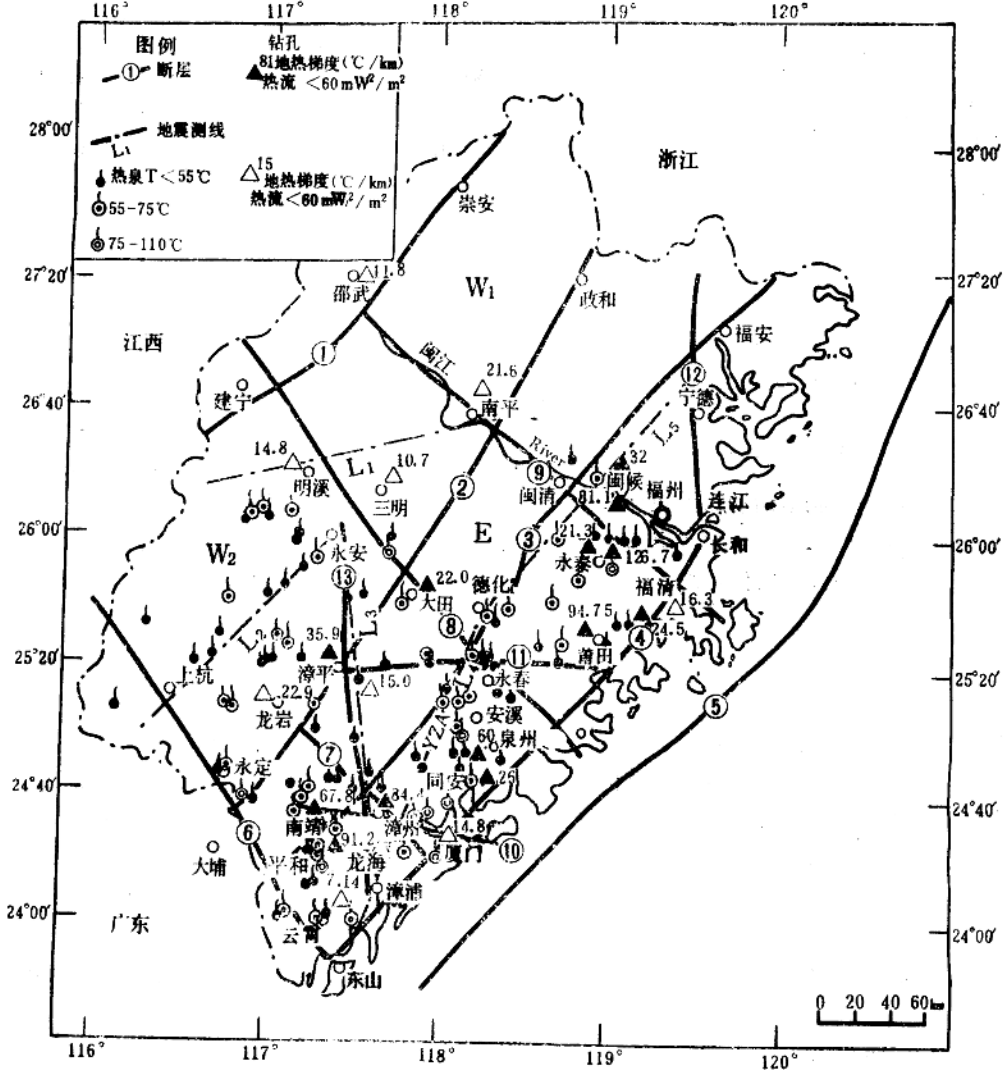


图 1-1 地热显示和断裂系统分布图

(只给出了最主要的断裂，它们与热泉的形成和控热构造有关)

Fig.1-1 Distribution of geothermal manifestations and the fault systems
(Only the most important faults are shown which have governed the tectonics and the formation of hot springs.)

* 本节的大部分地质资料引自“地质专报：福建省区域地质志”(1985)⁽²⁾，其它资料引自文献(4)。

有元古界沉积岩出露，最古老的岩层在W1单元，而古生界沉积岩层分布于W2区域。三叠、侏罗系岩层广泛分布于全省，但是在东部单元E中多被中生界火山岩、侵入岩和变质岩所覆盖。另外，福建省还具有下列主要特征：多种沉积建造，多期喷发的火山岩带，多期侵入的岩浆岩带，多期的岩浆岩和变质岩带都呈NE向带状分布。这些带大致平行于太平洋板块和欧亚板块的俯冲带。

自从元古代以来，作为地壳变形的结果，主要是产生褶皱和断裂，形成一系列NE走向的背斜和向斜。图1-1和表1-1给出了最主要的断层。特别是NE向的岩石圈断裂①、②、③、④控制了多期的岩浆侵入作用和火山喷发，现在断裂带分布的基本格架自三叠纪太平洋—欧亚俯冲以来就已形成。

以NE、NW、EW和NS走向的四大断裂体系为特征的断裂构造发育很好，其中最重要的是NE向断裂带，其长度超过200km（只有部分在福建省内），宽度为几十公里，目前处于压性剪切状态。这些断裂带的形成年代各不相同，自元古代、古生代至中生代早期和中期都有，断层③—⑩在晚三叠世最终形成。在位于俯冲带与中国大陆沿海之间欧亚大陆边缘地区发生大规模的新生代构造活动（如裂谷作用，火山活动和造山运动）期间，福建境内伴随有小规模的侵入活动、火山活动、断块运动及隆起等作用。近期的活动表现为大地震和高频度的小震、大量的地热显示以及大地隆起（见表1-1），现今太平洋板块俯冲的速率约为每年6-7cm^[3]。

表 1-1 主要的断层数据

Tab. 1-1 Data of important faults

断层名称	编号	形成年代	方向	长度(km)	宽度(km)	类型	现代活动性
崇安-石城	1	元古代	NE	220	20~30	压剪性	1346~1944年M6以上地震11次
政和-大埔	2	元古代	NE	390	20	压剪性	抬升速率2mm/a
福安-南靖	3	晚古生代	NE	225		压剪性	地震和多处温泉分布
长乐-南澳	4	晚古生代 晚三叠世 (最终形成)	NE	400	38~58	压剪性	自1600年以来发生12次破坏性地震，三次M7和一次M8级，有许多地热温泉，沿海地区抬升速率为2mm/a。
闽粤滨海	5	(同4)	NE	1000	60	压剪性	非常活动，发生过许多大地震，M8、M7和许多M6级。
上杭-云霄	6	晚元古代 早古生代	NW	200	20	张剪性	丰富的地热活动。
九龙江	7	古生代	NW	150	10	张剪性	许多地震，串状分布的热泉。
永安-晋江	8	古生代	NW	200	20	张剪性	地热活动。
顺昌-闽清	9	侏罗纪	NW	150	20	压剪性	地热活动。
厦门-南靖	10	晚侏罗世	EW	130	5~20	压剪性	非常活动，地震区，1445年M8级，1791年M7级，丰富的地热温泉。
漳平-永春	11	元古代	EW	50	15~20	压剪性	丰富的地热活动，区域抬升速率+1.8--2.3mm/a
寿宁-连江	12	晚侏罗世	NS	180	15~20	压剪性	丰富的地热活动。
漳平-漳浦	13	元古代	NS	275	15~20	压剪性	地震与地热活动。

沿政和—大埔一线出露有加里东和华力西—印支期的超基性和酸性侵入岩；基性、中酸性和酸性的侵入岩多出露于闽西南，走向为NE。燕山期（侏罗—白垩纪）的侵入和火山活动规模很大，且为周期性的多次喷发。燕山早期斑状花岗岩的侵入发生在闽西北，闪长岩

和花岗闪长岩侵入于政和一大埔断裂带②的东部。数量最多的是遍布全省的黑云母花岗岩、花岗闪长岩和石英闪长岩，其次是大范围的燕山晚期侵入岩。花岗闪长岩和石英闪长岩主要出露在福安—南靖深大断裂③以东；此外，花岗岩类以NE走向分布在福建沿海的广大地区。地热学的两个最重要的准则是：高丰度的长寿命放射性同位素U、Th、K以及显示为大幅度布格负异常的延伸很大深度的花岗岩侵入体。喜山期侵入的规模小，成组出现在浦城—长汀，政和一大埔及长乐—南澳断裂一带。燕山期花岗岩的同位素年龄自西向东变小。例如，政和一大埔带②以西为140~200Ma，政和一大埔带②和福安—南靖线③之间为100~160Ma，而福安—南靖断裂③以东则为80~100Ma；在漳州东南沿海发现了非常年轻的基性侵入岩体，其同位素年龄只有0.7Ma，这与现代地热活动从西往东逐渐加强特征是一致的。

§ 3 地热调查

目前已知在福建省有190多处地热显示，其中约30%的热水温度超过60℃。测量了温度、温度梯度以及热流，在德化县测到了最高的泉水温度为89℃。在福州的一些钻孔内测到过107℃的温度，而漳州的一口正在不断喷出的热水井的水温为122℃。

华南地热资源分布于从福建省的福州地区开始，和广东、海南直到广西各省沿海的广大地区，该地区以具有NW向负梯度的大幅度布格负异常为特征。地热研究组测量了50多口井的温度随深度的分布，以及采自22个地点42口井中的750个岩样的热参数。图1-1和表1-2给出了大部分结果。

1. 很显然，图1-1所示的热泉均位于26°40'N以南。

2. 而且它们的分布以长乐—南澳断裂带④与福安—南靖断裂带③之间的东部地区最为稠密，测得该地区热泉的最高温度在80℃以上，地温梯度7~127℃/km和热流值为32~343mW/m²。表1-2显示出地热活动的不均匀分布，在福州和漳州盆地最为强烈。

3. 热泉的数目和平均水温均自西向东增大。

4. 地热资源大部分在断裂带附近。同时，也频繁地出现在NE、NW、EW和NS向活动断层的交汇区域。

5. 热泉数目自北向南增多。这可能除了活动的NW向张性断裂带和EW、NS向压剪性断裂带的切割与汇合作用之外，还有长乐南澳—福安南靖，福安南靖—政和大埔和浦城—武平—政和大埔各个断裂带的影响地区互相重合，使得地壳内破裂和缝隙增多的缘故。

6. 大量的燕山晚期花岗岩在闽东南和福州地区最为多见，由于其富含放射性同位素，故可能是产生较高热能的原因之一。

§ 4 爆炸地震勘探

为了获得地壳构造的信息，爆炸地震组进行了5条地震剖面的勘探：长390km的YCA—L4—L5测线和长261km的L3测线以及L1和L2(图1-1)。尤其是YCA—L4—L5和L3，由于它们横切地热显示和地震最多的主要活动断裂带，因而详细地进行了爆炸地震记录和分析研究工作。我们的注意力主要放在漳州盆地，该盆地内水热活动最为强烈，并且由于三条大

表 1-2 中国福建省的热流数据

Tab.1-2 Heat flow data in Fujian Province, China

地点	井深(m)	岩石类型	梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{km}$)	热导率 ($\text{Cal}/\text{ml}\cdot^{\circ}\text{C}$)	热流* (mW/m^2)	
福州	1	石英 ↓ 辉绿岩 ↓ 花岗岩	84.6	3.08	260.1	
	2		87.5	2.81	248.3	
	3		56.0	2.56	143.3	
	4		183.6	114.0	3.00	342.5
	5		254.0	63.3	2.67	168.8
漳州	1	花岗岩	84.4	2.72	229.3	
	2		200.0	74.9	2.74	205.4
闽侯	410.0	花岗岩	32.0	3.06	98.1	
永泰	1	花岗岩	126.7	3.06	387.5	
	2		183.0	21.3	3.16	67.2
浦田	1	花岗岩	99.5	3.49	347.4	
	2		99.0	2.85	256.8	
福清	1	花岗岩	16.7	3.26	54.8	
	2		15.9	3.17	50.4	
江口		花岗岩	24.5	3.30	80.9	
厦门	1	花岗岩	12.5	3.20	40.0	
	2		100.0	17.0	3.46	58.9
漳平	100.0	花岗岩	35.9	2.89	103.8	
大深	1	花岗岩	15.0	4.29	64.4	
	2		110.0	11.3	3.91	44.3
大田	850.0	花岗岩	22.0	3.45	73.7	
云霄	220.0	花岗岩	7.1	4.48	32.0	
龙海	160.0	花岗岩	20.0	2.63	52.6	
三明	176.0	花岗岩	10.7	3.09	33.0	
明溪	170.0	花岗岩	14.8			
南平	340.0	花岗岩	21.6			
邵武	200	花岗岩	11.8			

* 未经校正

断裂带(NW向的九龙江断裂⑦,EW向的厦门—南靖断裂⑩和NE向的长乐—南澳断裂)在此相交而引人注目。

1. 图1-2为计算的从云霄经漳州至安溪的YCA剖面二维地壳结构。表层的波速变化范围为5.15~5.30km/s。上地壳是一个波速随深度从5.15~5.30km/s增大到6.10~6.20km/s的过渡层,其速度梯度在地表最大并随深度增加而变小,它可作为上部地壳中水和裂隙作用的表征。

该过渡层之下是一个深度为10到14km的低速层。在漳州底下是一个速度低到5.80~6.00km/s的块体,其宽度为80~90km,厚度为3~4km。

再往下,在中、下地壳内各层的波速为6.20~6.50,6.60和6.80km/s。

上地幔顶部的速度从7.90至8.10km/s不等。莫霍面深度的变化范围为29.3~32.0km。

所有各层在漳州地区以南都向上弯曲,这也许是沿着推测的断层带的向上错位。该断层带与NW向的九龙江断层带一致,其倾角为60°倾向NE,宽约10km。

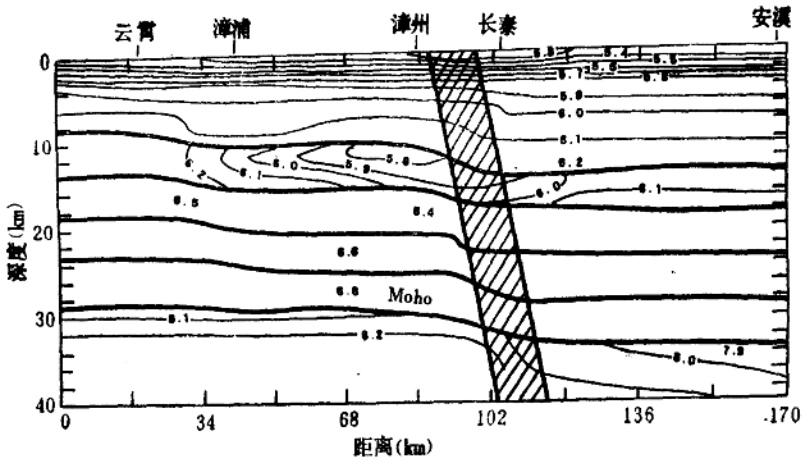


图 1-2 YCA测线的二维地震剖面
(图中数字为P波速度, km/s)

Fig. 1-2 Two dimensional seismic YCA profile

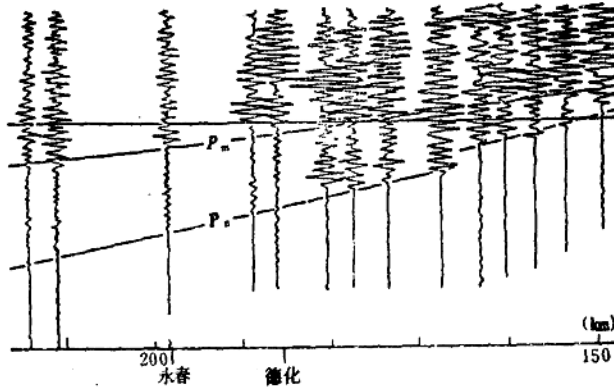


图 1-3 宁德炮点的远台地震记录, 注意到在德化附近P_s波的振幅突然减小

Fig. 1-3 Reduction of original recording of P_s waves. Note the abrupt decrease in wave amplitude in Dehua region

2. 在闽南, YCA-L4和L3剖面显示出经过上地幔顶部的P_n折射波明显衰减, 由于莫霍面反射波P_n非常强, 这种衰减可能显示具有高热低粘滞的异常上地幔(图1-3)。

3. 在一些地区, 尤其是漳州地区, 莫霍面反射的剪切S_n波的振幅强烈地衰减。这可能表明裂隙度高和存在部分熔融的岩体(图1-4)。

§ 5 分析、结论和建议

1. 就地热田的经济开发而言, 有两个主要因素是不可少的:

- (1) 160°C至200°C的大尺度热源, 其经济深度在3km以内, 近地表的更好;
- (2) 充足的补给水源。

2. 前面提到过, 热源分布于北纬26°40'以南, 我们研究中发现下列互相关联的诸因素

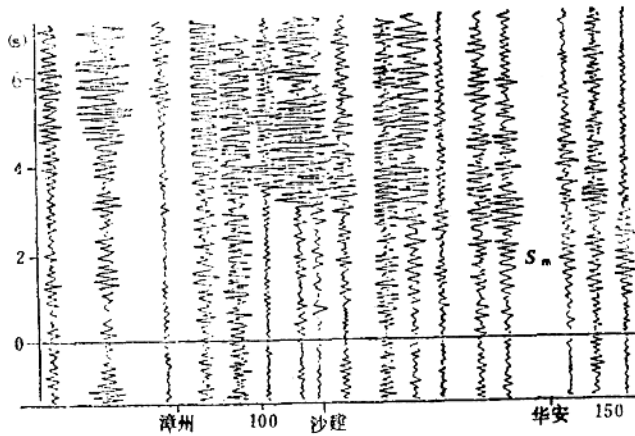


图 1-4 S_m 波的部分原始记录, 注意到在不同地段 S_m 波被强烈吸收
Fig.1-4 Reduction of original recording of S_m waves. Note the strong absorption of S_m waves in different regions

可能起着支配作用:

- (1) 由衰减的 P_n 波所表征的上地幔热异常和粘滞异常。
- (2) 穿过较薄地壳的传导热, 九龙江断裂带以南的地壳厚度仅为29.3km, 相比之下, 其北侧为32km甚至在其他地区更厚达35km。
- (3) 来自10km深处部分熔融区且富含裂隙的岩体的传导热, 它可能经由断层传导而从上地幔与下地壳得到补充。

(4) 来自大量延伸到很大深度的大量花岗岩体中长寿同位素U、Th、K的释放热能、大幅度布格负异常表明了此类花岗岩体的存在。在这一方面, 由于政和一大埔断裂带②以东的福建地区在燕山晚期有大规模的花岗岩侵入而得天独厚。另外, 在福安—南靖断裂带燕山晚期的花岗岩体的作用也极为重要。花岗岩、中性岩和基性岩的平均总产热率分别为818、340和 $120 \times 10^{-8} \text{Cal/gr} \cdot \text{a}^{[5]}$ 。

(5) 来自地壳某些部位未知的部分熔融侵入岩体的传导热, 反射剪切 S_m 波的强烈衰减显示出存在这类岩体的可能性。特别是在大断裂交汇地区内具有放射性同位素的侵入岩体, 可以预期在这些地区, 它们是沿断裂带热异常的主要热源。热物质可以经由断层带相交而形成的通道直接从下地壳和上地幔流出。

(6) 根据地表数据和航磁数据所作的数值模拟的初步估算表明, $150 \sim 160^\circ\text{C}$ 温度很可能出现在3km深度处, 这尚需进一步的反演工作来验证。

3. 热水的水来源于大气降水, 它们先下渗至很大的深度, 然后由于密度差而上升。目前应优先考虑那些有充足流水的地区。沿断层岩石的裂隙度是至关重要的。在剪切位错过程中产生了剪应力, 它们随距离增大而减小 (图1-5(a))。只要剪应力维持在扩容临界值 f^* 之上, 岩石就会屈服而破碎。扩容是指在剪应力下由于裂缝张开而致使体积膨胀的现象。在这些被称之为扩容区的地区, 应力变化范围在 $\tau = \tau_F$ (~ 40 至 80MPa) 与 $\tau = f^*$, ($f^* \sim \frac{1}{2} \tau_F$) 之间。在压性断层带, 强烈的剪切蠕变可以导致张性劈裂。特别是在压应力 σ_n 小的区域, 强烈的破碎可以为来自深部的热流体开辟曲折的通道。这也许可以解释为什

么沿断层带形成低压高温变质带和侵入带,以及热泉为何沿断层带分布。在长乐—南澳断裂带的某些部位确实找到了劈裂。图1-5(b)显示了有意义的通道的形成机制。由于强烈的剪切变形,应力发生重叠,反过来产生大尺度张性破裂,它们导致地震和大量的地热活动。

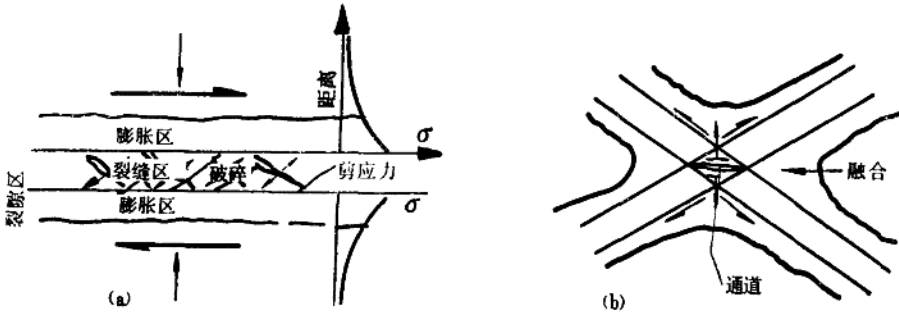


图 1-5 表明岩浆上升通道的形成和具有高渗透性的宽尺度裂缝区的示意图
 Fig.1-5 Cartoons showing the formation of conduits for magma ascension and wide scale fissured with higher permeability

具有10-20km宽度的汇合断层的影响区域可以融合在一起,从而使这些融合区域内的应力明显增大。而这反过来又产生新的互相连接的破裂,等等。最终导致较好的可渗透性。在闽东南有一个这样的融合地区,在那里,断层带②、③、④发生融合并且被断层带⑦和⑧所切割。由以上假设,我们得到了对前面描述的地热资源分布特征的理论解释。

在此研究基础上可以很有效地施行工程地质勘探。根据由航磁资料所得到的居里面可以大致上确定潜在热源区的位置,但这必须由浅部的地热数据和地磁资料来验证。由高精度重力测量可以确定隐伏断层的位置以及断层和基岩的横向延伸。另外,电阻率的测量有助于弄清岩体的裂隙度。在此种分析的基础上,我们能够建议在何处打多深的井最有利于找到该地区的热源和水流。

参 考 文 献

- (1) Downing R.A. and Gray D.A. (ed.), Geothermal Energy—The Potential in the U. K., His. maj. Stat. Office. London, 1985.
- (2) 福建省地质矿产局编, 福建省区域地质志, 中华人民共和国地质矿产部地质专报一, 区域地质, 第4号, 地质出版社, 1985.
- (3) Letouzey J. and Kimura Masasaki, Okinawa Through Genesis: Structure and evolution of a backarc basin developed in a continent, *Marine and Petr. Geol.*, 111-130, 1985.
- (4) 刘以宣著, 《华南沿海区域断裂构造分析》, 地震出版社, 19-46, 1981.
- (5) Kappelmeyer O. and Haenel R., Geothermics with spacial reference to application, Gebrud. Borntr., Berlin, 1974.
- (6) Tan Tjong Kie and Kang Wenfa, Time-dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes, *Proc. 5th Congress ISRM*, Melbourne, 95-102, 1983.
- (7) Tan Tjong Kie et al., Dilatancy creep and relaxation of brittle rocks measured with the 8000kN multipurpose triaxial apparatus, *Phs. Earth and Plan. Interiors* 55, 335-352, 1989.

Chapter 1

Geophysical and Geological Investigations of the Geothermal Resources in Fujian Province

Abstract

Our research groups have carried out tectonic studies, a geothermal survey and some seismic profiles. The authors present the idea that the characteristic geothermics of Fujian is due to an anomalous uppermantle at a depth of 29 km, partially melted and fissured massive inclusions and radioactive granitic masses. Deep faults and especially the tortuous channels in intersecting regions of faults create favourable conduits for the upward flow of hot substance. Watercirculation is promoted in the fissured fault zones and especially in their intersecting and merging regions. Some methods for engineering geology investigations are proposed.

§ 1 INTRODUCTION

Fujian Province is in great need of energy resources which are vital for the economic development. As the transport of coal and oil from other provinces is expensive, it is wishful first to explore and exploit its own natural resources of various kinds.

Fujian Province is a part of the Southern China folded system and metamorphic zone, it is situated on the outer zone of the Western part of the Circum Pacific volcanic belt. This region has tectonically been very active since the Caledonian era, the subduction of the Pacific-Eurasian plate in Triassic has created large scale folding and faulting in Eastern Fujian, which was decisive for the present configuration and the multicyclic emplacement of many types of intrusives especially granitic intrusives and batholiths and volcanics. As it will be discussed later these are basic factors which have created the geothermics of Fujian.

The geothermal manifestations are mainly distributed South of the $N26^{\circ}40'$ parallel along active faults in the broad band along the coast running from the Fuzhou region via Guangdong to Guangxi Provinces.

In this region most of the spring temperatures exceed 55°C at the surface, the average thermal gradient is about $50^{\circ}\text{C}/\text{km}$ and the average heat flow $160\text{ mW}/\text{m}^2$ which is higher than the world average of $26-30^{\circ}\text{C}/\text{km}$ and $60\text{ mW}/\text{m}^2$ respectively. These resources have been occasionally exploited since many years. In order to study the feasibility of an overall and efficient economic exploitation of the geothermal potential in the whole province, the Institute of Geophysics of the Academia Sinica in joint collaboration with the Fujian Bureau of Geology and Mining has made a widescale research, headed by the first author. The purpose is to analyse the interrelation between temperature field, geophysical field, crustal structure, water-