

勘查地球物理 勘查地球化学文集

第 7 集

中国地热物化探专辑

陈昌礼 主编

地 质 出 版 社

勘查地球物理
勘查地球化学文集

第 7 集

中国地热物化探专辑

陈昌礼 主编

地质出版社

勘查地球物理勘查地球化学文集

第7集

中国地热物化探专辑

陈昌礼 主编

责任编辑：李 颖

地质出版社出版发行

(北京西四)

地质出版社印刷厂印刷

(北京海淀区学院路29号)

新华书店总店科技发行所经销

开本：787×1092¹/₁₆ 印张：17⁷/₈ 字数：420,000
1988年2月北京第一版·1988年2月北京第一次印刷
印数：1—1600册 国内定价：4.25元

ISBN 7-116-00104-2/P.092

发展物化探，扩大地热开发领域

代 序

地球是从一个高温熔融状态开始她的生命的。若干亿年以来，她不断向太空散发着热量。地球表面因冷却而形成坚硬的外壳开始了岩石圈的地质时代，她仍然慢慢地继续散发着热量。这个过程就象长江和黄河一样，不知何年开始，又不知何年终止流淌着的滔滔江水。当今地壳下面直到地核仍然蕴藏着巨大的潜在热能。什么时候、用什么办法使这样巨大潜在热能为人类服务，这个愿望一直激励着人们的努力。

温泉是远古以来人类最早见到与利用的地热能，然而系统地勘查与开发地热能还是近几十年的事。特别是70年代一度出现的能源危机，曾掀起开发地热能的高潮，然而由于技术上的困难，这种能源的开发还极为有限，在人类能源结构中还只占很小的百分比。不过它是必要的能源补充并为工农业所广泛利用，其价值就不能用“热量”来计算，而是其他能源所不能替代的。

地热能开发的困难何在？正如新西兰学者Banwell 1970年曾指出的：“目前对地热能了解甚少，直到最近，地热能勘探技术还类似于上个世纪的石油勘探技术，即根据石油渗出地表的位置去勘探石油”。也就是说，当前地热勘探水平与19世纪“见油苗找油”水平相当。用我们的话来说，它与我国20年代“见矿找矿”的水平相当。况且，地热能目前还不能作长途运输，温泉出露的地方未必是能源紧缺的地方，而能源紧缺的地方常常没有温泉。这对地热能开发是根本性的限制。

半个多世纪的油气资源勘探与开发的历史告诉我们：油气资源开发的大飞跃就是摆脱了“就油苗找油”的被动局面，这无疑要归功于地球物理勘探方法的应用与发展，使人们找到了埋在地下几百米至几千米的储油构造和含油层。这个历史的经验给予地热勘探人员以重要启示：地热能开发的大飞跃必须研究和发展适用于地热勘探的整套地球物理勘探方法，以寻找当代技术上可采深度的地热资源。

自从70年代初，李四光教授在他一生中最后几年呼吁和组织地热能勘探以后的十几年来，我国地热资源勘探与开发几乎遍及全国各省、自治区和直辖市，并且取得了一批成果。特别是近年中，地球物理勘探在地热资源勘探与开发中已经发挥了重要作用，取得了显著成果。为了及时总结经验和进一步推动工作，我们编辑了这本地热物化探论文集。它介绍了我国目前地热勘探所采用的主要物化探方法和我国主要地热区的基本成果。

我国地热地质学家根据已有资料，提出我国有六条地热带。我们根据这些地热带的地形、地质和地球物理特点，归纳为以下三种类型：

1. 喜马拉雅期侵入岩或火山岩高温型。高温地热与近代火山活动和年轻的侵入体活动有密切关系。在我国有滇藏高原和台湾。滇藏高原位于欧亚板块与印度板块的缝合带，台湾与日本列岛一样同为太平洋板块与欧亚板块的缝合带。这些缝合带上有年轻的岩浆侵

人和火山活动，伴随着高温温泉和气象出露，并有强震活动。西藏羊八井和台湾均建有具工业价值的地热电站。

2. 燕山期侵入岩中温型。与燕山期花岗岩分布有关，常常有温泉出露，这些温泉大多为中温：40—100℃左右。其中，位于东南沿海接近欧亚板块前沿的燕山晚期花岗岩，有较强的新构造活动，表现为小地震密集区，如福建、广东、辽东半岛等，这一带集中了我国温泉的半数以上。这种地热类型的地区，在可采深度内是否存在可供工业发电（150℃以上）的地热能资源，正是人们努力探索的一个课题。

3. 盆地和古潜山中低温型。这种类型大多由石油钻井或水文钻井发现的地温梯度异常带，这种地温梯度异常带的地温梯度高于地壳平均地温梯度。主要由于地下古生代石灰岩发育的断裂溶洞，利于深层地下水的循环，并且提高了上覆第三纪和第四纪孔隙水的温度。该类地区有北京、天津、华北平原、松辽平原以及渤海凹陷。覆盖层水温一般在40—80℃之间，钻入3000—4000m灰岩中的深油井，水温可达100—140℃。

这本文集包括上述三种类型总结的各自适用的、有效的物化探方法和主要成果。然而这些成果还只是初步的。从近期可以预见的技术进步来看，我们认为地热物化探应作以下努力：

1. 迅速提高地温场理论研究，地温测量的技术水平，地温场和热物理参数测量仪器的研制。地球温度场是地球物理场的一种。地壳的温度异常是地热资源的直接标志，地温法是地热资源勘探的一种“直接找矿”方法。然而目前还没有编制地温法规范，地温测量取得的资料还基本上停留在定性解释水平等等。而我国地温场测量水平与国际先进水平有一段差距。因此加强地温场理论研究，提高测量技术水平，研制地温法仪器系列是地热物探的当务之急。

地温法的一些主要课题有：1—30m浅层测温方法的完善并形成生产力，收集全国地热、矿产、油气井的井温资料，编制全国、各省、区的地温场图，开展全国性地热流测量，其中特别应加强岩石热导率测量技术研究和仪器研制，原位测定技术研究等；普遍开展油气、矿产、水文工程和民井井温测量，以扩大地热资源勘探的潜力。

2. 加强区域和探部地球物理资料研究。从当前地热资源开发水平和经济效益，以及地球物理方法的成熟程度来看，近期内仅以深部地热资源开发为目的而广泛开展区域和深部地球物理测量还不现实。但是，就全国各部门而言，卅年来区域和深部地球物理资料已经积累得相当丰富，在综合研究这些资料时，很少与地热资源的区划与远景评价联系起来，地热勘探部门很少注意相关学科所取得的区域和深部地球物理资料的收集、研究和利用。

地热资源是一种深部资源，为了规划全国、火区和全省的地热资源开发，探索某些地热类型是否存在可采深度范围内的高温地热等，都应当进行区域和探部地球物理调查和资料的综合研究。这些资料包括：航天和航空遥感图象分析；航磁和区域重力资料综合研究，其中包括莫氏面、康氏面和居里面研究；环形和线形构造分析和区域地温场和地热流资料研究等；天然和人工地震资料综合研究，天然地震还包括远震、微震和地噪声，人工地震包括地壳测深、转换波研究和反射地震；深部电法勘探包括大地电磁法、频率测深、大极距四级电测深或偶极测深等。

3. 发展适用的常规和轻便物化探方法。目前全国各省、自治区、直辖市差不多均已开展地热资源勘查与开发，我们应当积极发展与完善勘探地热田和储热构造的常规和轻便

物化探方法，以期在短期内能取得效果和效益。

几十年的物探发展史在油气、煤田和金属矿产勘探方面已逐渐形成一个大概的模式，而地热田勘探尚未形成固有的一套物探方法系统。根据最近五年比较广泛的工作经验以及本文集所收集的成果有如下粗略分类：第一种类型以西藏羊八井为代表，电测深再配以重磁法可以圈定地热田范围，MT法和深部地震研究可以扩大深部热源；第二种以福建为代表，主要采用磁法圈定富水裂隙构造，辅以测温和化探，微震和MT等方法研究可能的深部热源；第三类以京、津为代表，采用重力普查圈定灰岩古潜山隆起（埋深应大于500m，否则热能不利保存）辅以电法和磁法，京津地区物探还要注意克服城市的震、磁和电的干扰。

4. 积极配合沿海开放城市和工农业建设，在全国有远景的大中城市、沿海开放城市、经济特区、工矿区、旅游区以及农业集中地区，勘探和开发浅层地热田。在上述地区只要求有中低温地热田即能满足其能源的补充和医疗、旅游之用，其中尤以医疗与旅游业的经济效益十分明显。取得明显地质效果和社会经济效益后，会进一步促进地热物探方法的发展与提高。配合当前需要而勘探浅层中低温热田，并不等于放弃深部高温地热资源，相反，由于对浅层中低温热水的需求日益广泛，必将迫切提出区域远景评价和大规模开发无温泉出露的隐伏地热资源；随着技术进步，广泛开发深部高温地热田的新形势将在本世纪末下世纪初来到，让我们努力发展和完善地热物探方法体系来迎接这个地热开发的新时代吧！

陈昌礼

目 录

1. 从重力场看华南地壳结构与热源.....	王懋基 (1)
2. 华南及邻区地磁场与地幔热源.....	张用夏 (14)
3. 福建漳州沙建地热区的微震研究.....	周立功 刘汉俊 (27)
4. 综合物化探方法在福建热田勘探中的应用效果.....	陈彦杰 (58)
5. 华北平原北部地温场及地热资源评述.....	马 刚 (84)
6. 物探工作在北京地热普查中的应用.....	徐楚强 (104)
7. 西藏羊八井地热田的地球物理勘探方法及综合成果.....	吴 钦 叶建中 (118) 冯国良
8. 西藏羊八井热田大地电磁(MT)法研究	袁学诚 金国元 李 立 (128) 冯益普 朱建华 李 鹿 刚
9. 西藏羊八井地热田热测井技术及应用.....	奚 莉 (143)
10. 湫口地热地球物理、地球化学初步勘查.....	梁乃杰 (153)
11. 安徽温泉的地球物理特征.....	林 威 刘载聪 (167)
12. 矩谱法确定居里面深度及其在辽宁地热远景分析中的应用.....	穆石敏 焦新华 (175)
13. 利用航磁资料估算地温梯度方法的研究.....	周伏洪 (192)
14. 湖北英山地热区地温测量方法及效果.....	贾苓希 徐建华 关小平 (208)
15. 地热田氡的特征与 α 测量方法及其效果.....	贾文懿 唐 红 方 方 (230) 葛君伟 邹 力
16. 汞量测量在地热勘查中的应用.....	朱炳球 朱立新 瞿军校 (251)
17. 中国地热资源的基本特征与分布规律.....	陈梦熊 王泽斌 (263)

CONTENT

1. The crustal structure and source of heat in south China as viewed from gravity field..... *Wang Maoji* (1)
2. Geomagnetic field and heat source of the mantle in south China and its adjacent area.....*Zhang Yongxia* (14)
3. A study of microseismic activities at Shajian geothermal area of Zhangzhou, Fujian Province.....*Zhou Ligong, Liu Hanjun* (27)
4. Application results of integrated geophysical and geochemical exploration methods in Fujian geothermal field exploration *Chen Yanjie* (58)
5. Geothermal field and geothermal resources in the northern part of the north China plain *Ma Gang* (84)
6. Application of geophysical exploration in Beijing geothermal field*Xu Zuqiang* (104)
7. Geophysical exploration of Yangbajing geothermal field in Xizang Autonomous Region.....*Wu Oin, Ye Liangzhong, Feng Guoliang*(118)
8. Magnetotelluric studies in Yangbajing geothermal field, Tibet..... *Yuan Xuecheng, Jin Guoyuan, Li Li, Feng Yipu, Zhu Jiahua, Lu Gang* (128)
9. Thermal logging technique and application at Yangbajing geothermal field in Xizang(Tibet)Autonomous Region.....*Xi Li* (143)
10. A preliminary geophysical and geochemical exploration of Tuankou thermal area*Liang Naijie* (153)
11. Geophysical features of thermal springs in Anhui Province *Lin Wei, Liu Zaicong* (167)
12. Spectral analysis of moments for determination of the depth of Curie surface and its application in Liaoning area*Mu Shimin, Jiao Xinhua* (175)
13. Studies of the method in estimating the geothermal gradient by aeromagnetic anomaly.....*Zhou Fuhong* (192)
14. The method and effect of geothermal measurements in Yingshan geothermal area in Hubei.....*Jia Lingxi, Xu Jianhua, Guan Xiaoping* (208)
15. The characteristics of radon in geothermal fields and the methods and effects of α -measurements*Jia Wenyi, Tang Huang, Fang Fang, Ge Junwei, Zhou Li* (230)

16. The application of mercurimetric survey in geothermal exploration..... *Zhu Bingqiu, Zhu Lixin, Zhai Jiunxiao* (291)
17. The basic features and distribution rule of geothermal resources in China.....*Chen Mongxiong, Wang Zebin* (303)

从重力场看华南地壳结构与热源

王 懋 基

(地质矿产部航空物探遥感中心)

摘 要

本文讨论了华南重力场,大地构造和深部地壳构造的主要特征。在区域布格重力异常图上一个最有意义的特征是出现在东部的重力低,走向为 NNE,幅度 -50mGal ,宽度 1.60km ,延伸达 580km 。根据深地震测深剖面 and 重力模拟,认为此重力低主要是低密度上地幔引起,它的产生与东南沿海的岩浆活动和地热状态有密切关系。根据重力模型计算了异常上地幔温度和理论热流值,并从热流与重力异常的关系计算了花岗岩面积上的稳态热流值。获得的参数表明,东南沿海的莫霍面具有高温和高热流,是一个“热”的上地幔区。这里减薄的下地壳层与高的上地幔温度的推论是一致的。

一、重力异常及其性质

华南布格重力异常场的变化范围为 170mGal ,从沿海的 $+30\text{mGal}$ 向西北方向逐渐下降到 -140mGal (图 1)。引起异常的因素是由分布在不同深度的密度不均匀及其相互迭加的影响。这些不均匀性主要来源于上地幔密度的变化、地壳厚度的变化、地壳内密度界面的变化和地壳上部的密度变化,并反映出不同级次的异常场。

与深部因素有关的布格异常的主要部分是地壳厚度变化和上地幔不均匀性。在这个总的背景上迭加了地壳上部结构的效应。

作为区域异常, $1^\circ \times 1^\circ$ 布格异常的线性大小为几十到几百 km ,根据异常场的主要特征可划分为八个区,即:东部沿海重力梯度带,永安—浦城重力低,下扬子重力高,南部沿海重力缓坡带,鄂湘桂正负镶嵌异常区,大别山重力低,武陵山重力梯度带和鄂西重力低。它们反映了华南大地构造和深部构造骨架,在各单元之间都以重力梯度带为标志的深断裂为界(图 2)。根据地震测深资料,区域重力异常反映莫霍面起伏,并迭加了地壳与上地幔密度不均匀的影响,有些地区密度不均匀成为引起异常的主要因素,如永安—浦城重力低达 -50mGal ,莫霍面起伏仅 2km ,低密度上地幔是引起此重力低的主要原因。

从 $5' \times 5'$ 布格异常减去 $1^\circ \times 1^\circ$ 布格异常获得的剩余异常,相当于消除了地壳厚度变化,反映地壳不均匀性的局部异常。在各重力场分区内局部异常的形态和性质是不同的。在岩浆岩分布区地壳上部的岩性不均匀是引起局部异常的主要因素,华南褶皱系的永安—浦城重力低区和鄂湘桂正负异常区的大部分异常即属于这类性质,几乎所有重力低都对花岗岩穹窿构造,重力高对应沉积拗陷和某些前古生代地层出露区,即使窄的断陷区,由于两侧花岗岩的影响也显示重力高。所以花岗岩基本控制了华南重力场的分布。东南沿海

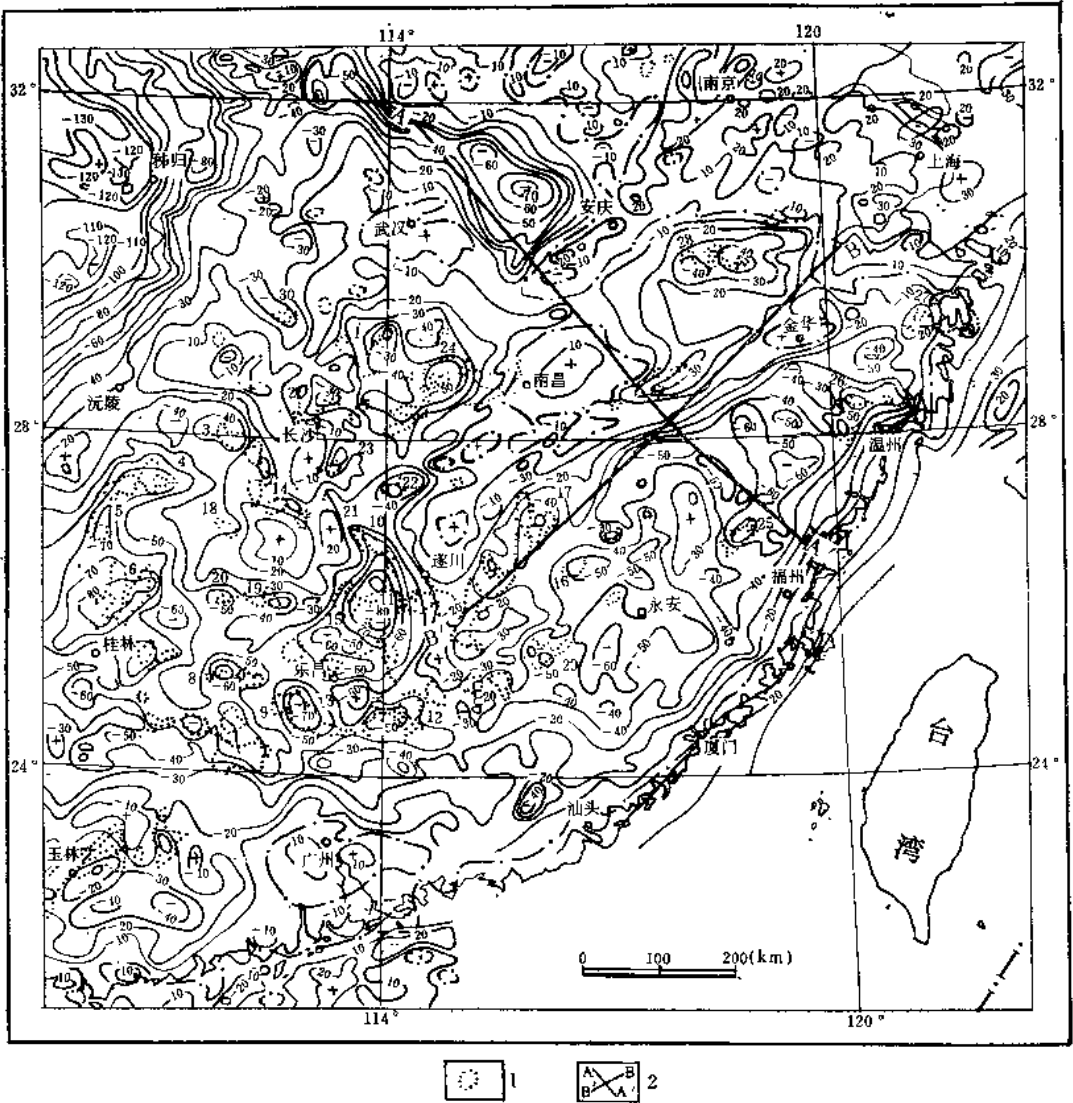


图 1 华南布格重力异常图
 Fig. 1 Bouguer gravity anomaly map of south China
 1—花岗岩露头; 2—爆炸地震剖面

由于受大陆边缘效应的影响使局部异常受到干扰而变得复杂。

在沉积覆盖层不太厚、基底岩性较均匀的地区，基底起伏是引起局部重力异常的一个因素。例如扬子准地台上的一些局部重力异常就反映了基底隆起和拗陷。这里岩浆岩的影响还是存在的。

在没有花岗岩分布的武陵山以西地区，局部异常主要反映基底起伏，基岩隆起反映重力高，中生代拗陷反映重力低，恰与华南褶皱区的情况相反。

再来分析埃利均衡异常。把 $5' \times 5'$ 均衡异常图与剩余异常图对比可以看出两者异常形态和大小都非常接近，只是均衡异常幅度稍大。这可以说明华南地壳已达到均衡状态，均衡异常主要反映地壳上部密度不均匀，这种密度变化在计算均衡改正时并未考虑。所以在

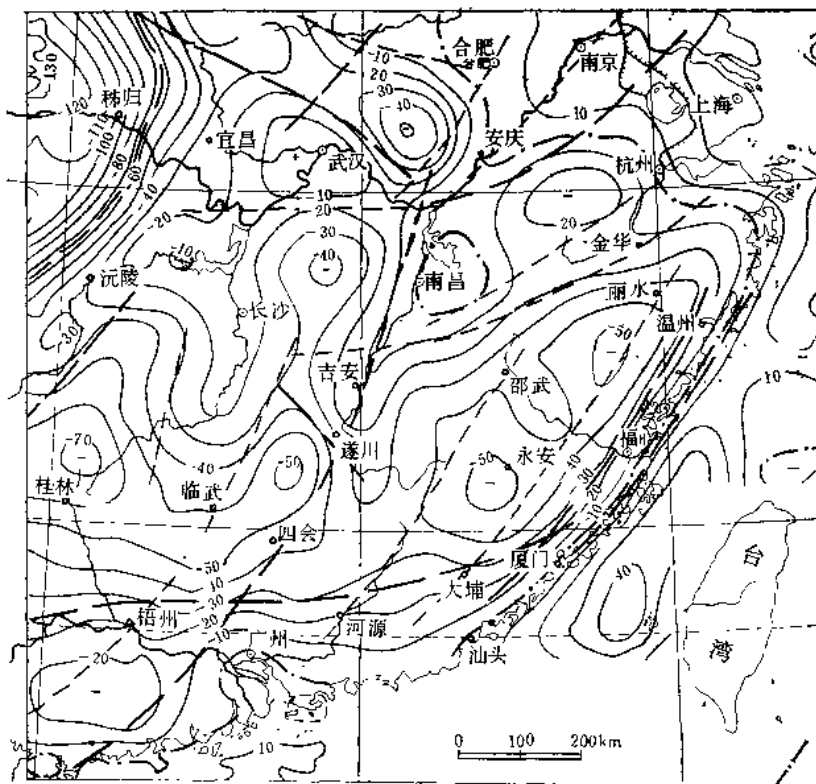


图 2 华南 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 布格重力异常图
 Fig. 2 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ Bouguer gravity anomaly map of south China
 1—深断裂；2—超深断裂

这个意义上均衡异常相当于剩余异常。

$1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 均衡异常的变化范围为 -10 到 25mGal ，强度很弱，表明华南地壳是接近均衡的。长波长均衡异常主要反映大区域和地壳深部的密度变化。应以大花岗岩基为核心的地形隆起上部显示负异常，但是庐庐和赣江断裂两侧的情况有所不同，西面负异常明显，东西不明显。在区域布格异常图上很醒目的永安—浦城重力负异常在均衡异常图上只有微弱反映。这种情况可解释为西部的花岗岩体延深大而东部则比较浅。所以赣江断裂两侧地壳平均密度是有差别的，东部高于西部，下扬子地区地壳平均密度最高。

根据重力异常的形态和性质对重力场进行分区是划分华南大地构造单元的主要依据。

二、地壳均衡

均衡研究是重力测量的一个重要方面。研究地壳的均衡状态实质上是研究反映在地形上的地表构造与深部构造的关系以及构造运动的性质。本节主要分析布格异常，均衡异常与地形高程的关系，并计算实际地壳厚度与均衡地壳厚度之间的偏差，用它来研究地壳均衡状态和补偿机制。

华南布格异常与地形高程有较好的相关性，其回归方程为：

$$\Delta g_B = 0.214 - 0.076\bar{h} \quad (\text{m}) \quad (1)$$

相关系数等于-0.944。在海平面处布格异常接近于零。这个关系表明了地表地形的均衡补偿。

均衡异常既反映均衡补偿状态，也反映在计算均衡改正时未估计的地壳密度变化。为了说明均衡异常是否与地形质量的补偿状态有关，需要研究均衡异常与平均地形高程的关系。我们对华南七个异常区估计了以下的数值：地形平均高程 \bar{h} ，均衡异常平均值 $\overline{\Delta g_I}$ ，地形高程方差 σ_h^2 ，均衡异常方差 $\sigma_{\Delta g}^2$ ，回归系数 A ，相关系数 R 。这些数值反映在表1均衡异常与地形高程的统计参数中。

表1

№	地 区	\bar{h} (km)	$\overline{\Delta g_I}$ (mGal)	$\sigma^2 h$ (km ²)	$\sigma^2 \Delta g$ (mGal ²)	R	A (mGal/km)
1	东部火山岩区	0.38	6.59	0.073	50.06	-0.58	-15
2	闽赣粤北区	0.41	3.47	0.039	106.3	-0.74	-38
3	鄂湘桂区	0.69	-9.9	0.052	49.2	-0.52	-16
4	鄂西区	1.03	-5.33	0.298	143.1	0.74	16
5	大别山区	0.29	-14.28	0.038	231.6	-0.78	-61
6	粤南区	0.15	5	0.016	71.4	-0.68	-46
7	长江中下游区	0.21	11.66	0.049	111.1	-0.84	-40

从表1看出，地形与均衡异常的相关性不强，高程的方差和均衡异常的方差都不大，这说明构造运动差异性不大，地壳处在较稳定的状态。从地形与均衡异常的相关关系看出只有鄂西区是正相关，此区的地形高程方差和均衡异常方差也较大，说明其构造运动是对抗均衡力发生的。华南其它地区的构造运动与均衡力一致，地形隆起目前还在继续。此外，位于郯庐和赣江断裂以西的3、4、5区以负均衡异常为特征，以东的1、2、6、7区都以正均衡异常为特征，反映断裂带两侧地壳密度的差异。

大面积花岗岩分布区的地壳均衡状态可以通过每个岩体的均衡补偿程度加以估计。我们选择13个大岩体计算了均衡地壳厚度，然后与结合地震资料得到的实际地壳厚度进行比较。对比结果两者很接近，表明大部分岩体已达到均衡状态。只是位于江南古隆起上的三个岩体实际地壳厚度大于均衡地壳厚度2—3km，可能是岩体受强烈剥蚀的原因。浙闽沿海的二个岩体实际地壳厚度小于均衡地壳厚度，可能与板块作用力的影响有关。

这个结论对于确定地表构造与深部构造间的关系是很重要的。因为起补偿作用的深部异常质量其绝对值与地形质量相等，因此根据地形质量的平均面密度（平均地形高程乘以上部地壳平均密度）可以估计单位面积上的深部异常质量。从世界上研究均衡的结果表明，补偿地形起伏的深部密度不均匀是由莫霍面起伏产生的，即符合埃利均衡假说；另一方面，在某些山脉下面存在异常地幔，上地幔的密度不均匀对维持均衡也起主要作用。因此，补偿地形质量可以是莫霍面起伏，也可能是地幔密度不均匀，或两者的综合因素。

解决莫霍面起伏在实现均衡中所起作用的简单方法是，求平均地形高程与由地震确定的地壳底部深度间的统计关系。

根据华南爆炸地震资料获得的地形高程与莫霍深度的回归方程为

$$H_M = 31.2 + 2.0\bar{h} \quad (2)$$

此处 H_M —莫霍面深度 (km); h —地形高程 (km)。莫霍面深度偏离回归线的均方差为 $\pm 1.85\text{km}$, 该值表示根据平均地形高程确定莫霍面深度的精度。相关系数为0.21, 说明二者相关性很弱。

为确定每个因素参与均衡补偿的程度, 可应用异常质量值求解。

根据埃利均衡方程

$$H_M = H_0 + \rho \cdot h / \Delta \rho \quad (3)$$

此处 $H_M - h$ 为零时的地壳厚度 (正常地壳厚度); ρ —地形质量的密度; $\Delta \rho$ —莫霍界面的密度差。如果认为均衡的实现是依靠莫霍面的起伏, 则方程 (2)、(3) 具有相同意义。因此, 根据回归系数可以计算为实现完全均衡时莫霍面所必须的密度差。从方程 (2)、(3) 得

$$\rho / \Delta \rho = 2.0$$

当地形质量的密度为 2.67g/cm^3 时, $\Delta \rho$ 达 1.3g/cm^3 , 这是完全不符合事实的。因为根据地震资料, 地壳的平均纵波速度为 6.28km/s , 上地幔平均纵波速度为 8.02km/s , 换算成密度分别等于 2.82g/cm^3 和 3.30g/cm^3 。由此可见, 莫霍面的实际密度差为 0.48g/cm^3 。实际密度差与完全均衡平衡时所必须的密度差之比给出实现均衡补偿中莫霍面起伏所参与的成份为 $0.48/1.3 = 0.37$, 即莫霍面起伏只能提供37%的补偿。将这个比例乘上平均地形高程得到虚拟地形, 这是按埃利模式在完全均衡条件下地壳厚度值所对应的地形。

实际地形高程与虚拟地形高程之差给出了由地壳与上地幔密度不均匀补偿的那部分地形。这个差值乘上地形质量的密度并改变其符号便得到单位面积上地壳与上地幔中的异常质量。

对信阳—宁德剖面计算了地壳与上地幔的异常质量 (图3)。在永平—宁德段上地幔存在明显的负剩余质量, 其最大值为 1500t/m^2 , 如果低密度上地幔的剩余密度为 -0.05g/cm^3 , 则其厚度可达 30km 。其中在松溪附近存在一个 800t/m^2 的正剩余质量, 反映地壳中存在高密度体。

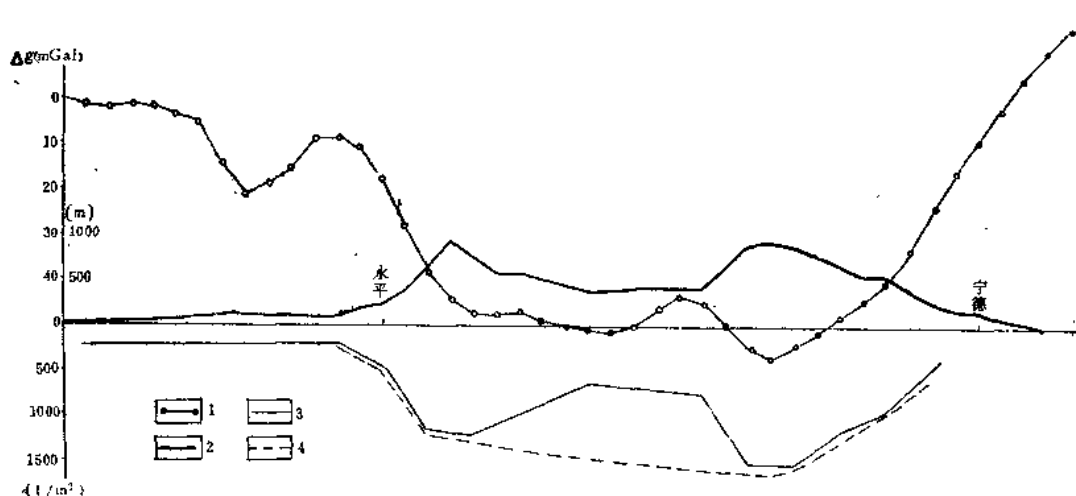


图 3 地壳与上地幔异常质量分布

Fig. 3 Mass distribution of crust and upper mantle anomaly

1—布格异常; 2—地形; 3—异常质量; 4—异常质量的区域分量

从华南大部分地区来说，莫霍面起伏仍然是起深部补偿的一个因素，这可以从补偿改正值（理论布格异常）非常接近观测异常得到证明。

三、地壳与上地幔重力模型

以地震资料为依据进行地壳与上地幔结构的重力模拟是研究深部构造的主要方法。利用研究地区的两条地震剖面，对深部构造和表层地质体进行重力模拟并修改地震模型，使计算异常分别和区域异常与局部异常拟合，获得AA'（信阳—宁德）和BB'（杭州—赣州）两条地质—地球物理综合剖面（图4）。

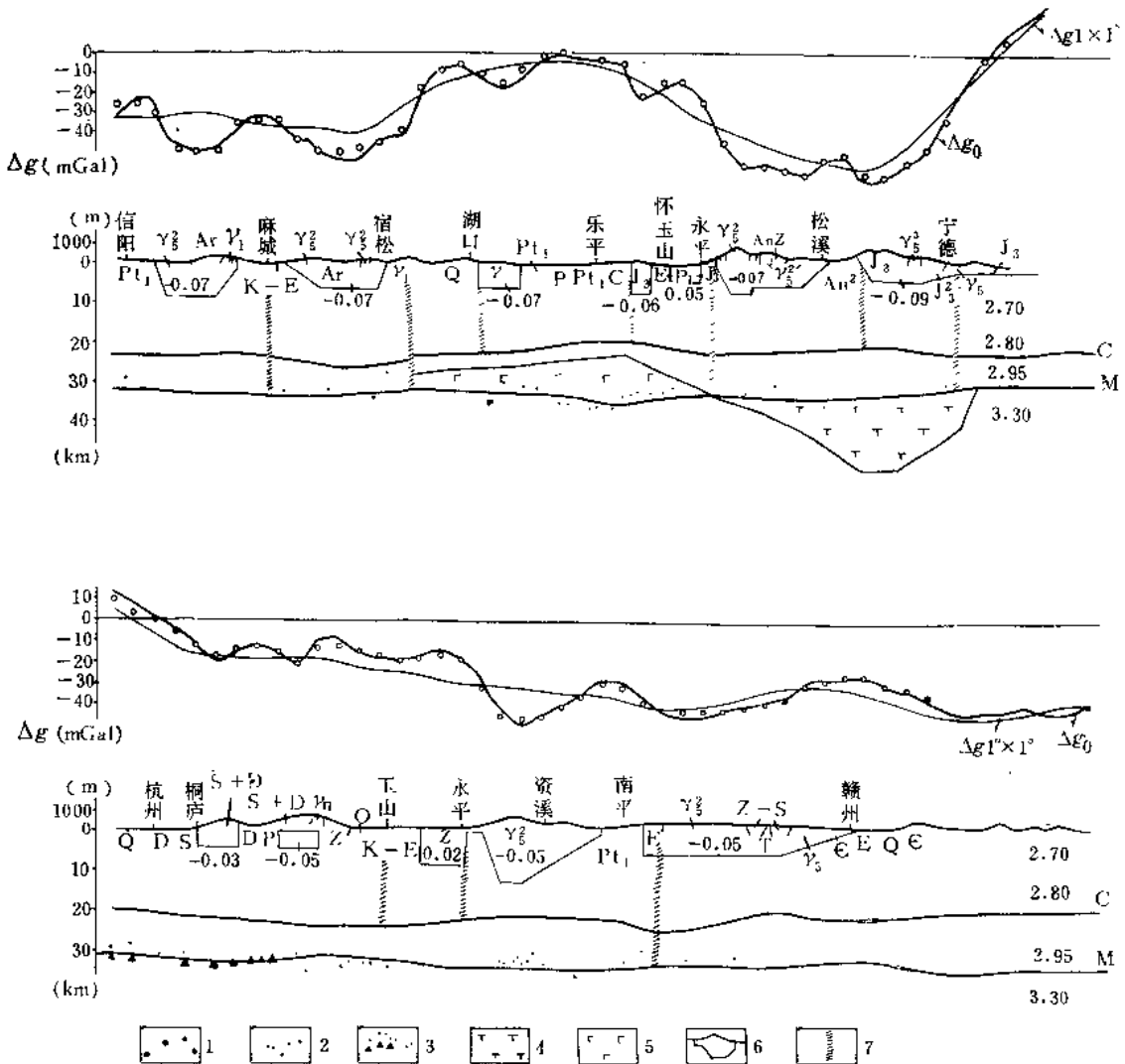


图 4 信阳—宁德，杭州—赣州地震—重力剖面

Fig. 4 Profile of seismic-gravity of Xinyang-Ningde, Hangzhou-Gangzhou

1—模型重力异常；2—地震测定的康纳界面；3—地震测定的莫霍界面；4—低密度上地幔；5—下地壳的高密度体；6—推断的表层地质体；7—推断深断裂

AA'剖面通过东部的区域重力低和中部鄱阳湖重力高。在重力低范围内莫霍面与康纳面的重力效应比观测异常高32mGal。这个重力低显然不是莫霍面拗陷的反映，加上地壳平均速度也无明显变化，因此存在低密度上地幔的可能性很大。据有关资料报导，在地幔中存在几十km厚的部分熔融区时，密度减小达0.05—0.1g/cm³，相应重力异常应达几十到100mGal^[1]。松溪—宁德段由低密度上地幔引起的重力异常为-32mGal，若密度减小0.05g/cm³，24.5km厚的异常上地幔的重力效应可以拟合观测异常。在均衡分析中已提到，永平—宁德间上地幔存在负剩余质量，其厚度为30km，这是从不同的方面得到近似的结果。由于低密度上地幔接近地壳底部，使下部地壳发生部分熔融并与上地幔物质混熔，产生酸性岩浆和火山喷发。引起异常上地幔的原因是火山岩地区高的地幔温度，这可能和太平洋板块的俯冲有关，使这个地区下面产生热的地幔底辟，上升的地幔物质使地壳下部受到侵蚀引起地壳的减薄和下地壳层减小。地壳内的高温状态还可以从东部沿海丰富的中高温温泉并有第三纪喜马拉雅期岩浆岩活动得到间接证明。

剖面通过鄱阳湖北端反映一个30mGal的区域重力高，但莫霍面并无明显隆起。根据衡阳盆地下面发现有超镁铁岩侵位，以及其他盆地的类似情况，可以认为引起重力高的主要原因是地壳中存在高密度体。当地壳发生张裂时地幔及其部分熔物质上升并产生超镁铁岩侵位，它可能促进了盆地的下沉。但值得注意的是盆地上方的磁场却非常平静，一种可能的解释是深部岩浆岩的主要成分为钛磁铁矿，它比磁铁矿具有低得多的居里温度，一般为200—450℃^[2]，在这种条件下，侵入体不具明显的磁化强度。

位于加里东褶皱系的BB'剖面的重力模拟表明不存在异常的地壳与上地幔结构。

对剖面的局部异常进行解释时把重力场水平提高了7mGal，以前古生界地层出露区的重力场作为背景场，这样所有局部异常都对应花岗岩体。局部异常反演结果得到花岗岩的厚度一般小于10km，有的达15km，在大花岗岩基下面都反映莫霍面拗陷。

四、深部构造轮廓

华南的深地震资料很有限，为了提供比较完整的深部构造轮廓必须利用区域重力资料。通常用布格异常反演莫霍界面时，要求布格异常与莫霍界面深度间存在良好的相关性。我们根据测区内已知的莫霍界面深度点与布格异常进行相关统计，得到下面的回归方程

$$H_M = 30.9 - 0.04\Delta g_B \quad (4)$$

相关系数为-0.33。由于相关性不强，说明地壳与上地幔存在横向不均匀，因此不宜用单层均匀密度的反演方法。我们采用了以层块状地壳结构为前题的双对数量板方法^[3]。设每个重力异常由三维棱柱体引起，用量板计算每个柱体的上下界面深度和剩余密度，然后对所有异常的解释结果作统计分析，确定出几率最高的深度和密度差，以此作为需求界面的标准值。

我们在区域内选择了180个可解释的异常，首先对异常作初步处理（园滑、分解异常、选取零线），然后用双对数量板求得各块体的上下界面深度（ Z_1, Z_2 ）和横向密度差（ $\Delta\rho$ ）并进行统计分析，在单对数坐标纸上绘出变化曲线（图5）。从图上看，在20与34km处有两个峰值，与地震资料比较后看出它们代表康纳面和莫霍面的平均深度，密度曲线的峰

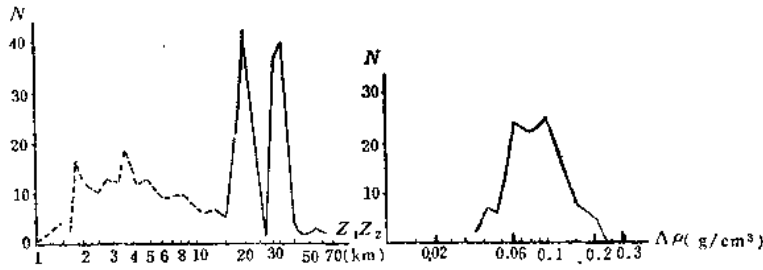


图 5 地壳界面和剩余密度统计分布曲线

Fig. 5 Statistic distribution curve of crust interface and residual density

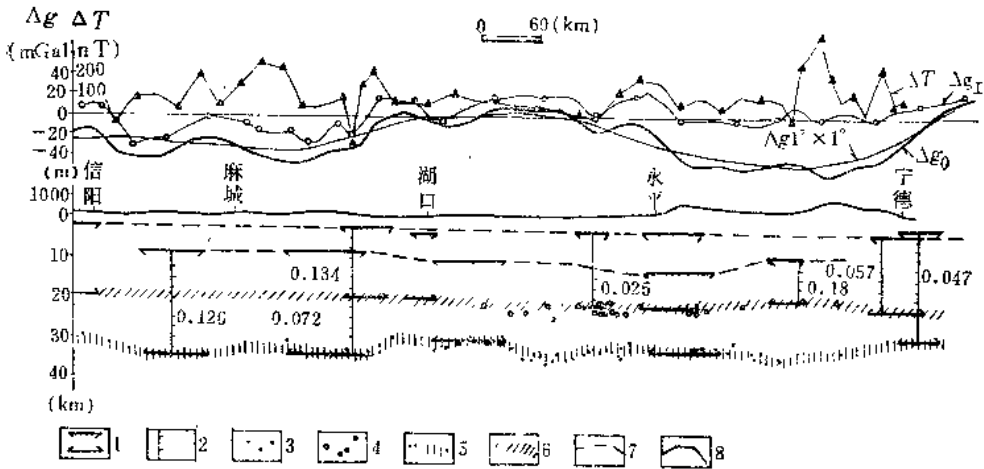


图 6 宁德—信阳重力推断地壳剖面图

Fig. 6 Gravity-inferred crust section of Ningde-Xinyang

1—块体上、下界面；2—断层，数字为横向密度差；3—地震测定的莫霍界面；4—地震测定的康纳界面；5—莫霍界面；6—康纳界面；7—地壳上层界面；8—地形剖面

值为 $0.06-0.1\text{g/cm}^3$ 。

根据统计结果确定的界面深度范围并结合地震资料绘制了地壳剖面图（图6）和莫霍界面深度，康纳界面深度和下地壳层厚度图（图7,8,9），其主要特征如下：

1. 莫霍界面深度范围为 $28-41\text{km}$ ，过武陵山后从 34km 急剧增加到 41km ，沿海地区为 $28-32\text{km}$ ，其余地区起伏平缓，为 $32-36\text{km}$ 。在大花岗岩基穹窿下面都产生莫霍面拗陷，沉积盆地下面莫霍面隆起。（该图由重力推断深度点、爆炸地震测定和天然地震测定深度点勾绘）

2. 康纳界面深度可以近似代表上地壳层厚度，变化范围为 $16-24\text{km}$ ，东部较平缓（ $20-23\text{km}$ ），西部变化较大（ $16-24\text{km}$ ）。在大花岗岩的穹窿构造上地壳层厚度增加，地壳密度减小；向斜构造上厚度减薄，地壳密度相应增高。花岗岩分布区地壳厚度的增加主要依靠上地壳层的加厚，这些地区经过迴返后伴随着上升而形成大的花岗岩基。

3. 下地壳层厚度的变化范围为 $8-20\text{km}$ ，比上地壳层厚度薄，大致和地壳厚度的变化趋势相同。在武陵山以西和沿海一带，地壳厚度与下地壳层厚度呈正相关，这表明这一带的地壳增厚主要依靠下地壳层的加厚，这与深部物质的变换过程有关。沿海一带下地壳