

中国地壳上地幔 地球物理探测成果

国家地震局《深部物探成果》编写组

地震出版社

中国地壳上地幔地球物理 探测成果

国家地震局《深部物探成果》编写组

地震出版社

1986

1.12. 188

内 容 提 要

为了进行大陆地壳研究、地震预报、矿产预测、重大工程建设,近年来我国较为广泛地开展了深部地球物理探测工作,取得了大量宝贵的资料。为了使这些资料更好地发挥作用,本书汇总了1966—1981年间各单位利用深地震测深、工程爆破观测、天然地震测深、电磁测深以及运用重、磁、地热资料研究深部构造所获得的成果,以供地学研究人员、地震预报研究人员、地质及地球物理勘探人员使用。

中国地壳上地幔地球物理 探测成果

国家地震局《深部物探成果》编写组

责任编辑:姚家榴

*

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

一二〇一工厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 26印张 664千字

1986年12月第一版 1986年12月第一次印刷

印数0001—1000

统一书号:13180·393 定价:8.20元

编 者 的 话

1966年邢台7.2级强震后,根据地震科研、地震预报工作的需要,我国较为广泛地开展了深部地球物理综合探测工作,取得了大量宝贵的第一手资料,这对研究天然地震发生的深部孕震环境具有十分重要的意义,同时对发展地学理论、矿产预测、重大工程建设等都有重要作用。

为了较为系统地汇总这些资料,更有效地发挥它们的作用,促进这项工作深入开展,国家地震局组织并主持编写了这本书。书中主要汇编了1966—1981年国家地震局所属各单位以及其他系统所取得的深部地球物理探测成果资料。

王国治、毛桐恩具体组织了本书的编写工作,孙武城为本书的技术顾问。全书由编写组集体完成。各部分的执笔人如下:一、概论:毛桐恩;二、华北地区:孙武城、祝治平、张家茹、孙强民、张明汇、郑远泾;三、东北地区:卢造勋;四、西北地区:朱佐全;五、西南地区:侯作中;六、华东地区:张国臣、孙强民;七、华南地区:顾群、孙强民。统编中孙强民做了大量的具体工作。

本书在编写过程中得到很多单位和个人的大力支持和协助,在此表示衷心感谢!

编 者

序 言

对大陆岩石圈，特别是大陆地壳的研究是现代地球科学的前沿。这是因为至今对大陆岩石圈的性质、演化和动力学的认识不够多，甚至比对大洋岩石圈的了解还少。因此，这个地球科学中的空白，就使大陆及其边缘成了固体地球科学的主要研究目标。

大陆的组成与大洋不同，它具有较低的平均密度，已在地幔上漂浮几十亿年。它们经历过多期构造变动和热事件过程，其演化历史是复杂的。如果说古大洋已经消失的话，大陆则保存着近95%的地球历史遗迹。更重要的是大陆为我们提供了几乎所有的矿产和能源资源及人类生存的空间。

近年来随着人们对未来资源和减轻地震灾害的日益关心，新技术的进步及广泛应用，已使地壳、岩石圈的研究，从地球表面上两度空间的板块格式转到地球的第三维——深度。深部探测这个课题目前处于重大发现的阶段。许多国家实行了探测大陆深部构造的科学规划，常常获得令人惊讶的新资料，例如切过地壳上部或全部的，既有压性也有张性的缓倾斜断裂相当发育；下地壳中的高速层内不仅包括玄武岩，至少局部也包括石英-长石质岩石，而且下地壳中也具有近水平的构造等。可以说过去有关大陆深部构造及其组成的老观念已逐步被刷新，有关大陆构造的新概念正在发展和形成。

我国解放后即逐步开始了深部的探测研究，特别是近年来运用多种手段和方法，包括深地震测深、工程爆破观测、天然地震测深、电磁测深及运用重、磁、地热资料研究深部构造等，取得了丰富的成果，它们大多已收集在这本书中了。这些材料使我们对我国地壳构造的基本轮廓以及若干地区和构造带的地壳细结构有了较深入的认识，这是十分可喜的。

然而从深入研究我国大陆构造、减轻地震灾害的总目标出发，与世界先进国家相比，我国的深部探测工作，无论在深度、广度和精度方面，都还有很大差距。例如现代深钻技术已达到12至15km深度，并取出岩芯获得深部岩石的直接证据，这在我国目前尚未达到。再就是地震反射剖面技术，在我国除油田探测中广泛应用于沉积盆地研究之外，还很少用于大陆地壳探测，使之能穿过地壳达到40km左右的深度。还有利用全球数字地震台网提供的深部信息，运用地震波射线层析技术，进行全球或局部范围的地球内部三维制图等等。这些我们都必须迎头赶上。

当前，为了充分发挥现有成果在寻找资源、减轻灾害、保护环境中的作用，还必须对这些丰富的深部信息进行地质、地球化学和地球物理综合研究，使之能够被更有效地利用。

马杏垣

1985.4.22

目 录

一、概 论	(1)
(一)深部地球物理探测研究的作用和意义	(1)
(二)深部地球物理探测方法及探测仪器	(3)
(三)深部地球物理探测研究工作现状概述	(7)
1. 我国地壳结构基本轮廓的研究	(7)
2. 我国地壳分区细结构的探测研究	(17)
二、华北地区	(20)
(一)深地震测深	(20)
1. 方法技术	(22)
2. 资料解释	(27)
3. 元氏-济南连续剖面	(42)
4. 乐亭-张家口剖面	(52)
5. 宁河-北京-涿鹿剖面	(59)
6. 安国-永清-遵化剖面	(65)
7. 盐山-大兴-延庆剖面	(72)
8. 柏各庄-丰南-丰宁-正兰旗剖面	(78)
9. 塘沽-密云剖面	(86)
10. 海兴-雄县-阳原-丰镇剖面	(94)
11. 任县-河间-武清剖面	(103)
12. 河间-武清剖面	(115)
13. 华北地区地壳上地幔某些特征 ——深地震测深探测成果	(119)
(二)工程爆破观测	(124)
1. 京津唐张地区	(124)
2. 北京地区	(127)
3. 晋中南地区	(135)
(三)天然地震测深	(138)
1. 华北北部转换波测深	(138)
2. 北京地区三维 P 波速度结构	(148)
3. 临汾盆地地壳结构研究	(153)
(四)电磁测深	(154)
1. 华北地区大地电磁测深	(154)
2. 渤海地区磁测深	(156)
(五)利用重磁资料研究深部构造	(161)

1. 重力资料反演	(161)
2. 华北地区均衡重力异常的研究	(175)
3. 华北平原重磁同源状态及其与地震的相关现象	(178)
4. 华北断块的居里面	(182)
(六)华北地区地热与地壳上地幔构造	(187)
1. 方法技术	(187)
2. 热流数据与热流分布特征	(189)
3. 地壳上地幔温度-深度曲线	(190)
4. 地壳上地幔温度-深度剖面	(190)
(七)华北地区地壳上地幔探测成果要点	(192)
(八)华北地区地壳上地幔构造与地震的关系探讨	(193)
三、东北地区	(198)
(一)深地震测深法	(198)
1. 敖包营子及寨子井测深点	(198)
2. 阎阳-海城-东沟剖面	(198)
(二)天然地震及工程爆破法	(206)
1. 辽南地区	(206)
2. 北京-萨哈林剖面地幔纵向速度分布的研究	(213)
(三)大地电磁测深	(215)
(四)重力资料反演	(217)
1. 东北全区	(217)
2. 辽南地区	(227)
(五)地热及其研究	(229)
(六)东北地区深部构造特征	(230)
四、西北地区	(232)
(一)深地震测深	(232)
1. 观测系统和观测剖面	(232)
2. 时距曲线和波组特征	(233)
3. 地壳的分层速度结构	(236)
4. 青海柴达木东盆地的地壳构造	(238)
(二)工程爆破测深	(241)
1. 陕西石砭峪爆破	(241)
2. 新疆伊犁爆破	(243)
3. 青海乐都爆破	(244)
(三)天然地震测深	(247)
1. 甘肃及邻近地区的地壳厚度	(247)
2. 甘肃地区的分层地壳结构	(250)
3. 新疆塔里木盆地的地壳分层结构及瑞利波 Q_R 值	(253)
(四)大地电磁测深	(266)
1. 大地电磁测深工作概况	(266)
2. 各测点的视电阻率曲线和一维反演结果	(262)

3. 资料的处理和分析方法说明	(279)
4. 西北某些地区地壳和上地幔构造的大地电磁解释	(281)
(五)重力资料反演	(286)
1. 资料来源	(286)
2. 地壳结构模式及计算方法说明	(286)
3. 甘肃西部地区的地壳构造基本轮廓	(287)
4. 甘肃西部地区的均衡异常特征	(288)
(六)西北地区深部构造特征	(289)
五、西南地区	(292)
(一)深地震测深	(292)
1. 青藏高原当雄-亚东剖面	(292)
2. 龙陵Ⅲ剖面	(304)
(二)天然地震测深	(305)
1. 青藏高原瑞利波群速度与地壳构造	(307)
2. 青藏高原 P 波走时与上地幔结构	(310)
3. 龙陵地区的地壳厚度	(313)
(三)电磁测深和地磁测深	(313)
1. 青藏高原大地电磁测深	(313)
2. 云南省的地磁测深	(315)
(四)重力资料反演地壳构造	(319)
1. 喜马拉雅山中部地区	(319)
2. 云贵地区	(322)
(五)航磁异常与深部地壳构造	(323)
(六)西南地区深部地球物理探测成果要点	(326)
六、华东地区	(328)
(一)深地震测深	(328)
1. 连云港-临沂-泗水剖面	(328)
2. 菏泽-林县-长治剖面	(328)
(二)工程爆破地震观测	(340)
1. 黑旺爆破观测	(340)
2. 随县爆破观测	(342)
(三)临沂地区地震转换波测深	(343)
(四)重力资料反演	(345)
1. 鲁中南地区	(345)
2. 浙江省区	(350)
3. 东海海域	(352)
(五)电磁测深	(354)
1. 临沂地区大地电磁测深	(354)
2. 余山地区上地幔电导率	(356)
(六)大地热流测量	(356)

(七)华东地区地壳深部探测成果要点	(360)
七、华南地区	(362)
(一)工程爆破观测	(362)
1. 永平千吨级工程爆破观测	(363)
2. 广东云浮、中山、五华、斗门四次工业爆破观测	(370)
3. 广西柳州爆破观测	(371)
(二)南海地震声纳浮标测量	(373)
1. 测区概况	(373)
2. 观测系统	(373)
3. 南海海盆的速度结构	(373)
4. 南海海盆的地壳厚度	(377)
(三)天然地震测深	(380)
1. 大亚湾地区转换波测深	(380)
2. 河源地区天然地震测深	(387)
(四)重磁资料反演结果	(388)
1. 粤桂湘地区	(388)
2. 闽赣两省	(394)
3. 海南岛、西沙群岛、中沙群岛	(395)
4. 南海中部和北部	(397)
5. 台湾省	(400)
(五)电磁测深	(401)
(六)南海北部大地热流测量	(402)
(七)华南地区地壳深部结构特征	(403)
参考文献	(405)

一、概 论

深部地球物理探测通常是指用定量的地球物理学方法对地壳和上地幔进行探测研究。常用的深部地球物理探测方法有：人工源地震测深、天然地震测深、大地电磁测深、地磁测深、重磁资料反演解释以及大地热流观测等。

地壳和上地幔是地球科学的重要研究对象，深部地球物理探测研究工作一直受到国际地球学界和有关部门以及各国政府关注和支持。继六十年代的国际地壳上地幔计划和七十年代的国际地球动力学计划之后，八十年代国际大地测量和地球物理联合会与国际地质科学联合会又联合提出了国际固体地球科学研究规划，即岩石圈研究新规划。这些计划的制定和实施，加强了各国地学家之间的对话和合作，大大推动了深部地球物理探测研究工作的开展。

我国的深部地球物理探测研究工作始于五十年代。1966年邢台7.2级地震以后，我国的地震和地球物理工作者在积极进行地震预测预报研究工作的同时，较大规模地开展了深部地球物理探测研究工作。在1977年召开的全国自然科学学科规划会议上，把“地壳与上地幔及其与成矿规律和地震成因的关系”列入了国家重点科研项目。其后，国家地震局又于1978年和1980年讨论制定了“全国深部地球物理探测规划布局（草案）”。我国的深部地球物理探测研究工作受到了国家的重视和支持。七十年代以来，我国的深部探测方法逐步齐全，探测仪器逐步更新，资料分析处理技术不断改进，室内高温高压实验相互配合，形成了综合地球物理探测的能力。探测研究地区从陆地扩展到了海域，构造活动区和相对稳定区的对比研究工作也在进行，这些深部探测研究工作取得了非常宝贵的成果资料。其中，于京津唐及其周围地区、松辽平原、东北海城震区、中国南北地震带、滇西、郯庐断裂带、青藏高原、泉州-汕头地震带以及东海南海海域等我国大陆和海域的重点探测地区和地段取得了较好的资料。

近年来，我国在深部地球物理探测研究中与国际的合作和交流日益增多。联合国开发计划署对我国京津唐地区给予了深部探测的技术援助，预计1980—1984年将完成深地震测深剖面3000km；中、美在我国滇西地震实验场开展了深地震测深项目的合作；中、法在青藏高原进行了深地震测深、大地电磁测深项目的合作；与此同时，中、美还在我国南海海域开展了深部构造探测研究的科技合作等等。

目前，我国从事深部地球物理探测研究工作的主要部门有国家地震局、中国科学院、地质矿产部、石油工业部、国家海洋局以及有关高等院校。其研究领域涉及地震成因和地震预报的研究，地壳和上地幔结构构造的研究，石油、天然气等矿产资源及地热资源的圈定开发，重大工程建设的区域稳定性研究等各个方面。我国深部地球物理探测研究队伍正在不断壮大。

（一）深部地球物理探测研究工作的作用和意义

深部地球物理探测给人们带来了不能直接观察和测量到的地球深部的各种信息，借此人

们可以间接地了解和研究地壳上地幔的结构构造、物质组成、物质的物理性质化学性质以及热力学状态，这对正确认识地球的演化和发展地学理论都具有十分重要的意义。本世纪六十年代以来，在海底地貌、震源分布、海洋地磁异常、古地磁、海洋地质等方面的研究获得了突飞猛进的发展，特别是大量深部地球物理探测资料和研究成果的积累，才使人们有可能从理论上对全球活动方式作出概括和总结，从而提出有关地球构造过程的统一概念和理论，建立了板块构造学说。同时，深部地球物理探测工作的开展又推动着板块构造学说的应用和发展，它既可以研究现代板块的运动与划分，又可以对古板块的划分进行研究。例如根据深部探测资料，有人提出中国大陆东部的郯庐断裂带可能就是古代板块的消减带。

深部地球物理探测工作大大丰富和加深了人们对地壳和上地幔的认识。根据地震波等新的深部探测资料，上地幔的分层有了重大修订。利用天然地震面波频散资料对我国地壳结构的研究表明，在蒙古块体、塔里木块体和华南块体内康拉界面较为清晰和稳定，而在华北块体和青藏块体内康拉界面却不明显和不稳定，表现出了地壳分层结构的区域性特征。由地震测深资料获得的我国大陆地区地壳上地幔是由低速和高速介质相间而成，具有多层速度结构特征；由大地电磁测深资料获得的我国大陆地区地壳上地幔是由低阻和高阻介质相间而成，具有多层电性结构特征。这种层状结构在垂向上不同地区有很大的差异，在横向上则显示出十分复杂的情况。它们或者表现为各层厚度的变化和界面的起伏，或者表现为电阻率、地震波速度、介质品质因数、热流值等物理参量具有横向非均匀性，在构造复杂的地区这种非均匀性甚至发生突变。

在深部探测资料缺乏的地区，过去常将表层构造向下延伸来代替深部构造，现在越来越多的资料证明地表构造与深部构造之间并不完全一致。在南北地震带的中段（天水—武都段），地表构造为东西向的秦岭褶皱带，而深部却存在近南北向的构造带，将南北地震带的南段与北段联通起来。以往认为地壳结构随着深度的增加而趋于简单的说法，现在看来是值得怀疑的。深部探测资料表明华北地区地壳结构十分复杂，不仅深大断裂发育断距较大，而且深部界面起伏剧烈，呈波浪式，有厚壳区、薄壳区及地壳厚度梯级带（过渡带），在上地幔内高导层也存在着隆起和拗陷。华北地区地表的起伏只有1—2km，浅部断裂构造的落差为2—3km，可是在昌平厚壳区西侧的昌平—高崖口，深大断裂切过结晶基底的落差达6km多，莫霍面落差达4km以上，显示出深部构造的复杂性。

深部地球物理探测工作不仅可以从静态角度了解地壳上地幔的结构构造，而且还可以从动态角度研究地球的动力学、动力史，研究深部地质作用原理，并以此说明深部运动的过程与地表构造和地表所观测的地球物理场的关系。根据卫星资料得出的全球自由空气重力异常与巨大的大陆和洋底构造单元相比较，表明它们之间存在着确定的规律性。负重力异常对应大陆区的古老稳定地台和海洋区的深海沟；正重力异常对应大陆区的断裂活动带、地台活化区和海洋区的大洋中脊。全球大地热流的分布及重力异常的分布证实了上地幔存在着物质对流，上地幔软流层的存在也被地震波的低速层所证实。我国的大地电磁测深工作表明，我国大陆地壳和上地幔内存在着两类特征层，一类是地壳中部结晶地壳内的低阻层，另一类是上地幔内的高导层。壳内低阻层常与地震波低速层有一定的相应关系，它的存在常与构造活动密切相关。上地幔高导层则与古登堡低速层（即软流圈）相对应，它位于软流圈的顶部，在全球构造运动中起着重要作用。

深部地球物理探测工作对于地震成因的研究和地震预测预报具有重要意义。我国是一个

多地震的国家，据近2000年的地震史料统计，曾发生8级以上地震15次，7级以上地震79次。中国内陆地震约占世界内陆地震的70%，地震预报是地球科学的重要任务之一。中国内陆地震多属于浅源地震，震源深度一般不超过40km。震中多呈带状分布，常与断块边界的活动构造有关；震源在垂直方向上呈层分布，多集中于10—25km深处的花岗岩质层及前震旦系的老基底中。地震震源环境下的物性特征和热力学状态要靠深部探测工作来了解，地震孕育过程中震源区各种地球物理参量的变化也可以借助于深部探测工作来监测。通过深部地球物理探测工作，对我国几个重要震区的深部环境已经获得一些有意义的认识。

国家地震局地球物理勘探大队、地质研究所、地球物理研究所和辽宁省地震局，通过对唐山7.8级地震、海城7.3级地震震源环境的探测与剖析，认为我国大陆板内地震成因的相关因素可能有：(1)地壳中部壳内低阻层低速层的存在及其空间展布特征；(2)上地幔高导层顶面隆起及其附近斜坡；(3)地壳厚度变化的梯级带(莫霍面起伏的“拐点”)；地球物理场的梯级带；(4)浅部构造与深部构造的复合交汇部位；(5)高热流区和居里等温面的梯度带。

根据大地电磁测深和其它物探资料的综合分析，初步得出南北地震带北段、中段深部孕震环境具有以下主要特点：(1)地震带深部的上地幔高导层顶面呈条带状隆起；(2)强烈地震的断层走向、震中迁移方向与软流圈顶面等深线方向一致；(3)当深部和浅部构造不一致时，强烈地震往往发生在深部构造向上延伸与浅部构造向下延伸在地壳深处两者相交汇或汇而不交的地区；(4)强烈地震与壳内低阻层和上地幔高导层的局部隆起和拗陷有关。

利用重力、工程爆破、天然地震和深地震测深等方法，辽宁省地震局对辽南地区的地壳深部构造和震源深部环境进行了研究。所得结果表明，下辽河拗陷为一上地幔隆起区，走向为北东，其顶面的平均埋深为32km，东西边缘深为35—37km。隆起区东边缘的海城、营口一带存在明显的局部凸起，深度小于32km。此外，还发现在本区存在着低速层及重力不平衡地带。

利用深部地球物理探测所得的各种深部信息，可以划分地震活动带，圈定地震危险区，指明未来可能发生地震的地区和地段。同时，前兆异常的判别，前兆信息的解释，都离不开深部探测资料。因此，深部地球物理探测工作是地震科学研究的基础性工作之一。

深部地球物理探测工作对于矿产资源的预测和开发具有实际意义。事实上，许多深部地球物理探测方法本身以及所获得的深部探测资料就可以直接用于实用的地球物理勘探研究。地壳浅部矿产的形成与地壳上地幔以及整个地球的形成有着有机的联系，深部探测资料可以使人们认识矿产形成的深部环境及其区域性分布规律，从而进行矿产资源的预测。首先由航磁资料发现的我国郯庐大断裂，就不仅是一条重要的大地构造带，而且也是一条极重要的金属成矿控制带。近年来，我国先后在渤海、北部湾、黄海、东海以及珠江口海域进行了多种地球物理探查，取得了我国有关海域丰富的油气评价资料。因此，区域地球物理调查是矿产普查的重要手段，深部地球物理探测资料是矿产资源预测不可缺少的资料。

(二)深部地球物理探测方法及探测仪器

1. 人工源地震测深法

人工源地震测深包括使用爆炸源的深地震测深(DSS)和使用可控振源的大陆反射剖面测深(COCORP)。该法利用人工激发的弹性波，通过地表布设的地震接收仪，接收来自地下深

部界面的各种地震波(反射波、折射波),并根据地震波的动力学和运动学特征进行资料的分析计算,从而可以了解地壳上地幔速度结构的空问变化以及介质的各向异性等特征。在用地震测深法探测研究地壳上地幔时,折射波和反射波各具特色。折射波法所取得的数据代表一扁块体的性质,这个扁块体的宽度比厚度大许多倍。反射波法的数据则代表一柱状体的性质,它的宽度比厚度要小许多倍。折射波法所给的是较大面积的平均值,对内部的细结构不甚敏感。近乎垂直的反射波法可以给出地壳的细结构,但所反映的面积较小,深度也较浅。深地震测深(连续剖面法和点测深)法是宽角度反射和折射的结合,是我国使用较早的测深方法,也是我国探测研究地壳上地幔结构构造的主要方法。

在地震测深中,无论是反射波法、首波法还是面波法,都需要精确测定地震波的旅行时间和地震波形的动力学特征,所以地震仪器的主要任务是记录地震波的旅行时间和地震波形。地震仪按记录方式,可分为光点记录、模拟磁带记录和数字磁带记录几种形式。五十年代末,我国最早在西北地区开展的深地震测深,使用了一种光点低频地震仪,这种仪器与当时国内石油勘探的地震仪相似,最低谐振频率为10Hz,为了可靠地对比震相,每道检波器的间距为100m左右。1970—1972年,中国科学院与石油部合作,使用国产26道光点低频地震仪,采用连续剖面法完成了元氏—济南270km长的剖面。与此同时,国家地震局地球物理勘探大队在京津唐地区,使用经过改装的法国制造AS626X24道低频模拟磁带地震仪,利用工业爆破进行了深部探测的试验研究工作。1973年下半年,国家地震局地球物理勘探大队又与原山东省地震队合作,在华北平原南部使用该仪器开展了深地震点测深法的观测试验。

1975年下半年,国家地震局地球物理勘探大队与中国科学院地球物理研究所研制成功DCJ-1型五道低频模拟磁带地震记录仪,并开始在北京唐及华北地区使用。这种记录仪的检波器谐振频率约为1Hz,每三道检波器共用一个磁带记录器,检波器的间距约为3—10km。随后,地球物理勘探大队又相继研制了与DCJ-1相配套的仪器设备,组成了完整的适合深地震点测深法的WTC-75型地壳深部探测模拟磁带仪系列。地球物理勘探大队拥有这种仪器系列50多套,到1981年底使用这种仪器完成了5000km的深地震测深剖面。在我国的深地震测深工作中,还使用了另一种地震测深仪,这就是国家地震局地球物理研究所研制的CBY型模拟磁带地震记录仪。

1980年后,地球物理勘探大队为执行联合国开发计划署项目,接受了联合国开发计划署援助的数字地震测深仪器系统50套。该系统包括L-4C多用途地震检波器、PDR-1数字地震记录仪、WVTR时间频率接收装置、TDC-1时间显示控制器、DSP-1和DSP-3数字回放系统。这对促进我国深部地球物理探测研究工作的发展将起到推动作用。

可控振源法是近些年来在美国发展起来的一种地震测深方法,探测深度可达50km。石油工业部于七十年代末引进了美国的可控振源(vibro seis)设备。它由5个同步的可控振源(每个13.5t)和96个记录道(每道24个检波器)组成,分布在大约10km的距离上。工作时,可控振源发出频率线性变化的正弦信号,在20秒间隔中由8Hz变到32Hz,96道的地震信号以数字形式记录在磁带上,以供分析计算使用。

2. 天然地震波测深法

天然地震波测深法是以天然地震为激发源,利用天然地震的体波、面波或转换波来进行地壳上地幔探测的方法。这种方法具有简便、经济、探测深度大的优点。在地球介质内部传播的波为体波,在地球介质的界面附近传播的波为面波(沿自由介质表面传播的为瑞利面波,

沿两种不同介质的分界面传播的为勒夫面波，体波经过地球内界面发生波型转换的折射波和反射波称之为地震转换波。

根据天然地震体波进行地壳上地幔探测的原理同人工源深地震测深法。利用天然地震的面波研究地壳上地幔的结构构造，主要是利用面波的频散特性，即面波速度随频率而变化的现象。根据面波频散方程，相速度和群速度决定于地层及其下层介质的密度、纵波速度、横波速度和地层厚度，且与波长有关。对于地壳及上地幔的各种理论结构模型，可算出不同的理论频散曲线。由地震记录上量出的面波周期及对应于每个周期算出的相速度、群速度可以获得实验频散曲线，将实验频散曲线与理论频散曲线进行对比，就可以确定出地壳上地幔的介质性质和地壳厚度。

天然地震转换波测深通常利用远震激发的地震波。当这种地震波入射到速度分界面时，除了产生折射和反射外，还发生波型的转换，即由 P 波转换成 S 波，或由 S 波转换成 P 波。计算地面三分向地震仪上记录到的水平分量 PS 波震相对于初至 P 波的到时差 Δt_{ps} ，求得虚波速度后就可计算各转换界面的埋深，连接相邻测点的同一界面，可做出深部剖面图。

国家地震局地质研究所于1975年前后，使用国产的DD-1短周期微震仪开始了天然地震折射转换波测深的试验研究工作，测点距一般为5—10km。1980年后开始使用进口的Willmore模拟磁带地震仪和DR-100数字磁带地震仪。天然地震转换波测深法对北京地区的探测结果表明，该法对研究构造复杂的地区也是有效的，其结果可以和深地震测深相对应。

3. 大地电磁测深法和地磁测深法

大地电磁测深法的场源是地球的天然电磁场，其低频部分主要起因于地球磁层与太阳等离子体流的相互作用，而高频部分则主要与大气层中的雷电活动有关。大地电磁测深法因其具有不需要人工场源、勘探深度大、对低阻层有较高的分辨能力等特点，在深部地球物理探测和应用地球物理勘探中获得了日益广泛的应用。

场源研究表明，在通常的深部探测中，可以将大地电磁场视为向地球表面垂直入射的平面电磁波。电磁波在地球内部的传播特性与电磁波的频率和地球介质的电性分布有关。当地球介质为非均匀电性结构时，可以通过在地表观测正交的大地电磁场的四个水平分量，从而求得阻抗张量的各个元素。将阻抗张量元素旋转到主轴方向后，就可以获得沿构造走向方向和与构造走向相垂直方向上的阻抗张量元素和相应的张量视电阻率曲线。利用观测所得的视电阻率曲线与理论曲线的相互比较，在计算机上进行反演解释，就可以求得地壳上地幔的电性断面参数。

1962年，原中国科学院兰州地球物理研究所开始筹备大地电磁测深工作，并于1965年用自制的静磁原理光电负反馈大地电磁测深仪在西北地区开展了大地电磁测深的实测工作，取得了我国第一批大地电磁测深资料。1973年国家地震局地质研究所、兰州地震研究所、地球物理勘探大队三单位共同研制成功了LH-1型感应原理大地电磁测深仪，在我国的西北、华北和华南等地区开展了更多的深部探测工作。目前我国的绝大部分深部大地电磁测深资料都是用这种感应原理大地电磁测深仪取得的。这两种仪器系统的记录设备都属于光点式或笔挥式的模拟图形记录仪器，整个仪器系统的有效记录频带范围通常为几—几千秒。

仪器的数字化、自动化是所有地球物理探测仪器的发展方向。为了提高仪器系统的观测精度和动态范围，扩展仪器系统记录大地电磁扰动的有效频带，1981年国家地震局地质研究所与石油工业部物探局研制成功了SD-1型数字大地电磁测深仪系统和相应的软件系统。该

仪器系统分三个频段：高频段 $8-0.033\text{Hz}$ ；中频段 $0.5-0.0033\text{Hz}$ ；低频段 $0.025-0.00082\text{Hz}$ 。由于仪器向高频段的扩展，可以获得较浅部的地壳电性结构资料。

地磁测深是在对地磁台站观测到的地磁瞬时变化研究的基础上，近年来迅速发展起来的一种地球物理探测方法。地磁场的时空分布特征，一方面决定于场源，另一方面则与地球内部介质的性质密切相关。因此，对地磁场时空变化规律的研究，是揭示地球内部构造、探索地下介质属性的重要手段。在进行地磁测深观测时，需要以台阵形式同时连续观测地磁场的三个分量的短周期异常变化，进而根据电磁感应原理反演地下电磁构造的局部变化。

1978年以来，国家地震局地球物理研究所先后利用地磁台磁变仪记录到的短周期磁脉动信号和从加拿大引进的MFM-3型磁饱和磁力仪开展了地磁测深工作。1980年，中国科学院地球地理研究所研制成功了磁饱和磁力仪，为加速大地电磁测深、地磁测深工作和其它电磁感应原理的深部探测工作发挥了应有的作用。

4. 大地热流测量

大地热流测量可以探测研究地球内部的热状态和热过程。所谓大地热流是指地球内部以热传导方式在单位时间内通过地球单位面积的热量。热流值为热导率与温度梯度的乘积，只要测量某一温度间隔的地温梯度及岩石的热导率即可确定某一地点的传 导 热 流。在大陆地区，一般是在深钻孔(大于300m)或深坑道中直接测量地球内部的温度梯度。使用的测温仪有水银温度计、热敏电阻和热电偶三种。在海洋中，可以用一热流探针插入松软的海底沉积物中来测量温度梯度。

我国地质矿产部南海地质调查指挥部与美国拉蒙特-多尔蒂地质观测所在我国南海北部的大地热流测量中使用了美方研制的数字热流仪和针型探针装置。

大地热流测量结果与其它深部地球物理探测结果之间有着密切的关系。例如，大地电磁测深得到的地壳上地幔电性参数就在很大程度上取决于地下岩石热状态。匈牙利学者阿达姆(A. A'DA'M)提出了壳内和上地幔高导层埋藏深度 H 与区域大地热流值 Q 之间有如下经验关系式：

$$H = h_0 Q^{-a}. \quad (1.1)$$

对于壳内高导层来说，取 $h_0=35\text{km}$ ， $a=1.30$ 。对于上地幔高导层来说，取 $h_0=155\text{km}$ ， $a=1.46$ 。由大地电磁测深得到了壳内和上地幔高导层的埋深 H ，由上式就可以计算出该地的大地热流值 Q 。在我国华北地区，根据大地电磁测深结果由 $H = h_0 Q^{-a}$ 式计算出的大地热流值，与实际的大地热流观测值有较好的一致性。地球内的电性高导层与地震波低速层也往往有着对应关系。在高热流地区，高导层的埋深一般较浅，居里等温面的埋藏也偏浅。

5. 重磁法

利用重磁测量仪器在陆地、海洋、空中或者人造地球卫星上得到的重磁测量资料进行一定的数学分析处理，可以得到地壳上地幔的各种密度界面、居里面的起伏以及有关均衡状态的信息。

重磁资料包括浅部、深部以及与重磁有关的一切信息。对重力资料经过高度及中间层改正后便获得布格重力异常，它消除了大地水准面以上物质的影响。决定布格重力异常的因素是：(1)上地幔内部的不均匀性和莫霍面的起伏；(2)地壳固结杂岩体的内部不均匀性和这些杂岩体的表面起伏；(3)沉积盖层的构造特点。布格重力异常在大范围内的变化，主要反映了莫霍面的起伏。为了突出深部重力异常并压制浅部地质体的影响，可采用向上延拓的办法。

为了消除浅层构造因素的影响,获得较为单纯的反映地壳厚度变化的异常,可采用“剥皮法”。

利用重力资料研究地壳的均衡状态便得到了均衡异常。地壳的均衡理论是基于流体静力学平衡原理的一种假说。均衡学说认为,在地球内部某个深度处存在着一个均衡面,在此面以上地壳上部底面积相同的各种岩块都对它作用着相同的压力。当均衡异常的平均值接近零时,相当于该区域接近于均衡补偿状态。如均衡异常平均值大于零,则相当于区域均衡补偿过剩(地壳中有剩余质量)。如均衡异常平均值小于零,则相当于区域均衡补偿不足(地壳中质量亏损)。均衡异常的概念对于地壳运动和地壳结构的研究很有意义,研究结构表明,深部构造的重建(即“山根”和“反山根”的形成)比地表地形的形成时间要相对滞后一些。

鉴于重力均衡异常的计算相当繁琐,在某些地区甚至不能进行,所以有时可以用自由空间异常来代替均衡异常。自由空间异常对地表和近地表的质量分布很敏感,而与地形高程的相关性较弱。布格重力异常则明显地受地形高程变化的影响。因此,自由空间异常多用于海洋,布格重力异常多用于陆地。自由空间异常可以看作补偿深度为零的均衡异常,其大小等于均衡面深度为零的均衡异常值,它是均衡异常的一种特殊情况。同样,布格异常可以看作补偿深度为无穷大的均衡异常。换言之,均衡异常介于自由空间异常和布格异常之间,但更接近于自由空间异常,所以有时可以用自由空间异常来代替均衡异常。由此可见,重力测量在研究地壳上地幔的结构构造中具有重要作用。因此,重力资料反演也是深部地球物理探测的重要方法之一。

海洋重力测量、航空重力测量和卫星重力测量在我国开展得尚不广泛。国家地震局地震研究所研制了ZYZY型海洋重力仪,并取得了我国部分海域的深部重力探测资料,中国科技大学利用卫星重力测量资料研究了我国岩石圈下的地幔对流状态。

利用磁法资料探测研究地下深部构造是把在地表或空中观测到的磁场资料经过数学分析处理得到磁异常场,并经过“化极”、向上延拓后进行居里等温面的计算。根据岩石的热磁效应,当温度高于居里点温度(一般为530—560℃)时,岩石就失去磁性变成顺磁性物质。因此,地壳的磁性体只能延伸到地下一定的深度,这个深度即所谓居里等温面。地壳中居里面的形态反映了地壳内的热状态。

(三)深部地球物理探测研究工作现状概述

1. 我国地壳结构基本轮廓的研究

从六十年代初期起,我国便开始应用天然地震波研究地壳结构的基本轮廓,如曾融生等根据12个基本地震台记录的瑞利波,求出了我国不同地区瑞利波的相速度和地壳厚度;宋仲和等用10个基本台得到的39个地震的基型面波群速度确定了我国东半部、浅海区及西藏高原东部的地壳厚度;丁蕴玉利用11个台站记录的 SP' 波测定了台站附近的平均地壳厚度等等。这些研究成果,使人们对我国地壳构造轮廓有了最基本的认识。

1966年以后,随着我国地震事业的不断发展,地球科学工作者在探索研究的实践中发现,对地壳结构和地壳深部构造的研究,不但是地球科学中的重要研究课题,而且在地震预报、地震科学研究中起着越来越重要的作用,成了人们普遍关心的课题。因此,从地震预报和科研工作的需要出发,对我国的地壳结构进行了更加广泛和深入的探测研究,不但用天然地震波法,而且还采用重力资料反演以及深地震测深、工程爆破观测、电磁测深等多种地球物理

方法进行综合探测研究，不但研究成果的精度比过去有所提高，而且做出了全国的地壳厚度图。

(1) 地壳块体分区结构

1973年曾融生根据地震面波求得了我国各地区的地壳厚度，从重力均衡补偿原理出发，分析研究了地壳厚度与地形高度之间的关系(图1.1)。这种关系可以用图1.1中的两条直线来表示。

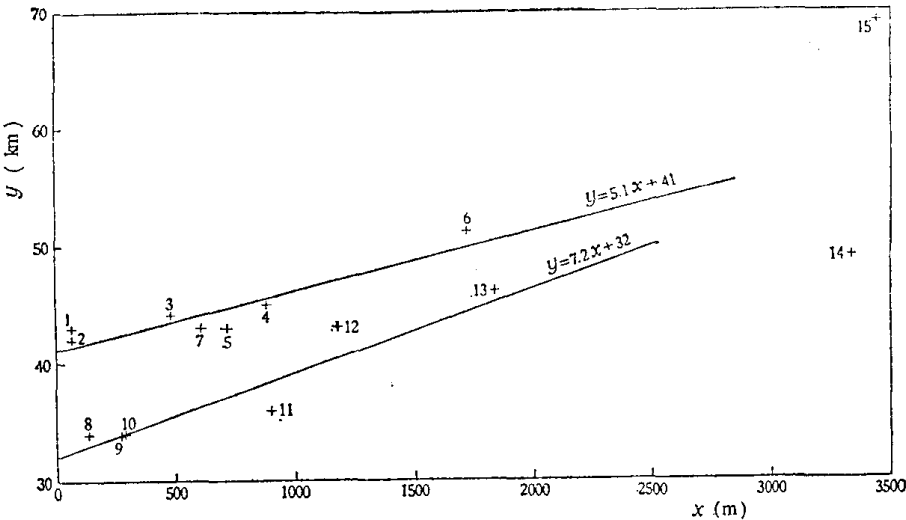


图1.1 地壳厚度与地形高度的关系曲线

表示。图中横坐标为地形高度，纵坐标为地壳厚度，十字旁边的数字表示该点在图1.2中的地理位置。可以明显地看出，1—6号点可用(1.2)式表示：

$$y = 5.1x + 41, \quad (1.2)$$

8—13号点可用(1.3)式表示：

$$y = 7.2x + 32. \quad (1.3)$$

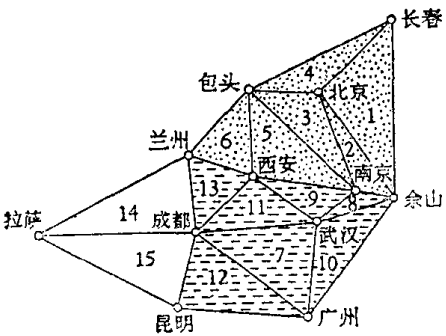


图1.2 地壳结构分区图示

1—6号点分布在兰州—西安—余山以北的地区(简称北区)，其地面地形高度 x 与莫霍界面深度 y 之间的关系符合方程(1.2)。8—13号点分布在兰州—成都—昆明以东、兰州—西安—余山以南的地区(简称南区)，地面地形高度与莫霍界面深度之间的关系基本上符合方程(1.3)。14和15号点分布在兰州—成都—昆明以西的地区(简称西区)，这两个点不在这两条直线上，表明它的地壳特征与北区和南区都不相同。据此可以认为，我国的地壳至少是由三个以上的单元组成。如果把以莫霍界面为顶面的上地幔视为一个重力补偿层，则北区和南区莫霍界面以上的地壳都分别各自达到重力均衡状态，地壳内物性比较均匀。但是不同分区的地壳，其物性不同，不仅地面地形高度为零时，莫霍界面的标准深度不同，而且地壳中密度分布也不相同。北区的莫霍界面标准深度为41km，地壳平均密度为 2.82g/cm^3 ，南区的莫霍界面标准深度为32km，地壳平均密度为 2.97g/cm^3 。

冯锐、朱介寿等利用天然地震面波频散资料，进一步研究了我国地壳结构及其分区问题。所使用的资料为我国15个基准台的19次地震面波记录，共利用面波射线28条(图1.3)，基本上把我国各主要构造区都扫到了。