

地 热 能

[英] H. C. H. 阿姆斯特德 编

科学出版社

内 容 简 介

本书着重介绍地热资源的普查勘探、钻井以及开发利用的特点和方法，并总结了世界各地在这方面的大量经验，是应用地热学方面的一本比较系统的、有参考价值的书籍，可供广大的地热、地质人员和地热开发利用工程技术人员参考，对有关地质大专院校师生也有参考意义。

Edited by H. Christopher H. Armstead

12

Earth sciences

GEOHERMAL ENERGY

Review of research and development

Unesco Paris 1973

地 热 能

[英] H. C. H. 阿姆斯特德 编

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1978年5月第一版 开本：787×1092 1/16

1978年5月第一次印刷 印张：13 1/2

印数：0001—8,300 字数：302,000

统一书号：13031·725

本社书号：1047·13—14

定价：1.65元

译 者 序

地壳上的某些地段蕴藏着丰富的地热资源，它和煤、石油等传统能源一样能用来发电，用于工农业供热和区域供暖等。地热资源的开发利用已经有七十多年的历史。由于它的优越性越来越明显，开发技术日趋成熟，再加上其它原因，所以自六十年代后期开始，开发利用的发展速度在加快，规模也越来越大。这本书基本上是地热资源调查和开发利用工作经验的一份总结。

本书分五大部分，即概论、勘探、开发、利用和其它（腐蚀控制和经营管理等）。第一部分谈的是有关地热资源的一些理论问题，地热带和地热田在环球构造带中的地位；第二部分是找热（资源）方法（包括地球物理方法和地球化学方法），地热地质学和地热水文地质学的基本内容，热田结构和水热活动的特点等；第三部分是地热流体开采，讲地热蒸汽的钻井技术，地热流体的压力、温度和流量测量方法，流体自井口至利用装置的输送方法；第四部分介绍地热发电、区域供暖和工农业利用的特点和技术；最后一部分介绍控制腐蚀、经济比较以及储量计算和如何合理地开发地热田等。

本书的优点是实用。绝大部分篇幅都用来介绍找寻和开发利用地热资源的方法，介绍世界各地在开发利用方面所积累的丰富经验，指出了存在的问题和研究方向等，因此，它在目前是比较好的一种应用地热学方面的参考书。地热资源的理论还不太成熟，热能的迁移富集规律还不太清楚，本书的第一部分用板块学说的观点介绍地热资源的富集规律，用放射性蜕变热解释地热的来源等，都难免有一些片面性。另外体例稍嫌零乱，章节间有重复，是为本书的不足之处。

我国幅员广大，地域辽阔。地热资源丰富，类型复杂多样。无产阶级文化大革命以来，在毛主席革命路线的指引下，在有条件的地区开展了找寻和开发利用地热资源的研究试验工作，并且取得了可喜的进展，千年沉睡的地热宝藏开始为社会主义革命和社会主义建设事业服务。本书不仅能使我们了解国外的现状，而且对我们的实际工作也有较大的参考意义。

本书由水利电力部科学研究所电力室、中国科学院地质研究所地热组和北京大学地质地理系地热研究组译校。本书附图均按原书复制。对于译校中不当之处，敬希读者不吝指正。

1976年2月

原 书 序

地热能源的见知于世和开发尽管有许多年了,特别是在冰岛、意大利和新西兰,但是,在世界其它地区寻找和开发新的地热能源的兴趣一直到最近才变得普遍起来。联合国曾经做过两件事来交流全世界许多地热工作者积累的大量的工作经验、研究、理论探讨和分析的成果。第一件事是1961年在罗马召开的联合国新能源会议。这次会议的很大一部分工作是关于地热能的,包括提交了80篇论文;第二件事发生在九年以后,即1970年在意大利比萨召开的联合国地热资源开发和利用讨论会,参加这次会议的有将近300名代表,提交了182篇论文。不论是罗马会议,还是比萨会议,都具有真正的国际性质,与会的代表和论文的作者来自世界上许多国家*。两次会议都用了许多时间讨论和交换彼此的想法。

另一方面,联合国教科文组织在1966年的第14届会议期间,在全体会议上曾经通过一项决议:授权教科文组织总监发起和促进关于地球科学研究的国际合作,其中包括加强地热资源的研究和建立勘探技术培训中心。

1968年,联合国教科文组织从已经有这方面经验的国家里挑选了一批专业人员,组成专门工作组,商量可能采取那些步骤来适应日益增长的,关于培训地热资源勘探人员,特别是地质、地球物理、地球化学以及钻探或生产等方面专业人员的需要。为了鼓励这些领域里的培训工作,联合国教科文组织支持组织短训班,特别是设在日本九州大学和意大利比萨的地热研究中心的短训班。

本书是关于地热能的一般性概论,它并不打算成为地热技术的一本百科全书,而只想成为一本入门书,使读者能够获得关于地热工作各个阶段的基本知识,从地热勘探到地热利用,包括地球构造、地热经济以及热田的经营管理等有关的一些课题。作者愿对他在本书中所表达的意见负责。

* 不论是罗马会议,还是比萨会议,都错误地让蒋帮的所谓代表窃据了中国人民的合法席位。——译者注

目 录

译者序	i
原书序	iii
前言	1

第一部分 概 论

什么是地热能?	H. C. H. 阿姆斯特德(英国)	2
一、地热能的性质和产状		2
二、地热开发的历史		3
三、地热能的应用		4
四、地热发展的障碍		4
五、地热的展望		5
基本理论	E. 布拉德(英国)	7
一、引言		7
二、地壳, 地幔与地核		7
三、地下温度与热流		9
四、热的来源		11
五、火山, 洋脊与岛弧		13
六、板块运动的机制		18
七、热至地表的传输		19
八、结论		19
参考文献		20

第二部分 勘 探

地质学和水文学在地热勘探中的作用	J. R. 麦克尼特(美国)	21
一、引言		21
二、普查区域的选择		21
三、勘探地区的选择		24
四、钻探位置的选择		26
五、钻探和试井		27
参考文献		29
地热勘探的地球物理方法	C. J. 班韦尔(新西兰)	31
一、引言		31
二、地热田的初步证据		31
三、水热系统的全球分布		32
四、所需要的原始资料		33
五、第一调查阶段		34

六、第二调查阶段	35
七、第三调查阶段	37
八、第四调查阶段：深部勘探钻进	38
九、热田的开发效应	39
参考文献	40
地热勘探的地球化学方法	G. E. 希格瓦达森(冰岛) 41
一、引言	41
二、热水和气体的类型	41
三、热水和热气的来源	43
四、地球化学勘探	45
五、地下气体压力, pH 和结垢现象	49
六、地热流体的取样	51
参考文献	51
地热田的结构和演变	G. 法卡(意大利) 54
一、引言	54
二、地热田的类型	54
三、地热蒸汽田的基本模型	55
四、低温热水田的基本模型	58
五、蒸汽田中的对流和蒸汽的形成	58
六、过热	58
七、矿物的沉淀	59
八、地表显示	59
九、加利福尼亚盖瑟尔斯地热田	60
十、日本大岳地热田	61
十一、意大利拉德瑞罗地热田	62
参考文献	64

第三部分 地热流体的开采

地热蒸汽和热水的钻井	松尾景次(日本) 65
一、引言	65
二、钻机	65
三、钻井方法	65
四、用泥浆循环的钻井方法	66
五、空气钻进	73
六、井孔测量	75
七、井孔间距	75
八、安全设施和预防	76
九、井孔维修	76
参考文献	77
井孔测量	N. D. 登奇(新西兰) 78
一、引言	78
二、热储及井孔条件	80

三、压力量测	84
四、温度量测	86
五、流量量测	88
六、综述	91
参考文献	92
地热流体的集中和输送	J. H. 史密斯(新西兰) 94
一、引言	94
二、井口装置	94
三、蒸汽的输送	97
四、热水的输送	98
五、两相输送	100
六、管道安装	101
参考文献	104

第四部分 地热流体的利用

地热发电	B. 伍德(英国) 106
一、已建成的地热电站	106
二、蒸汽中的污染物	107
三、地热系统材料选择的根据	107
四、采用的汽轮机的型式	109
五、凝汽式汽轮机	109
六、间接系统	110
七、汽轮机压力的选择	110
八、汽耗的粗估	111
九、机组容量的限制	112
十、凝汽器	112
十一、真空的选择	115
十二、冷却水	115
十三、气体的抽除	116
十四、抽气设备的类型	116
十五、气体压缩机	117
十六、气体的一般应加以注意的问题	117
十七、地热电站的调节	117
十八、热水的利用	118
十九、用非水流体代替蒸汽的考虑	119
参考文献	123
地热能的区域供热	S. S. 艾纳森(冰岛) 124
一、引言	124
二、地热利用的历史记载	125
三、技术情况	128
四、几个地热区域供热系统的描述	131
五、一些经济情况	136

参考文献	138
地热能的其他应用	B. 林达尔(冰岛) 140
一、引言	140
二、工业应用	140
三、农业及与农业有关的应用	149
四、疗养与保健应用	151
五、地热能在工艺供热中的应用	151
参考文献	155

第五部分 其 他

地热系统的腐蚀控制	T. 马歇尔, W. R. 布雷思韦特(新西兰) 157
一、引言	157
二、地热系统所遇到的各种腐蚀现象	157
三、地热系统设计和运行中的腐蚀控制	163
参考文献	167
地热经济	H. C. H. 阿姆斯特德(英国) 170
一、概述	170
二、成本的组成部分	170
三、基本假设	171
四、估计的理论投资成本	172
五、理论估计的重复出现成本	174
六、井口的热能成本	175
七、蒸汽(热水)集结地点的热能成本	176
八、关于理论热能成本的评论	176
九、实际热能成本	177
十、燃料的热能成本	178
十一、地热井孔的最佳利用	180
十二、地热发电成本概述	181
十三、地热发电的理论固定成本	181
十四、地热发电的理论生产成本	183
十五、地热发电的实际成本	184
十六、地热发电的杂项经济情况	185
十七、地热脱盐	185
十八、地热能在工业及其他方面的应用	185
十九、地热综合利用工厂	186
二十、一般经济考虑	186
二十一、结束语	187
参考文献	187
地热田的经营管理	R. S. 博尔顿(新西兰) 188
一、地热田能量潜力的估算	188
二、主要开发效应	190
三、次要开发效应	195

四、所需要的测量和记录工作	198
参考文献	200
单位换算表	201
汉英人名对照表	202
汉英地名对照表	203

前 言

地热能的勘探和开发,都需要有一组专长于各种不同学科的专业人员的共同努力。如果每位专业人员多少了解一些他的合作者的专业所要解决的问题和所掌握的技术,他能够在这项协同的工作中更好地发挥他自己专业的作用。本书将帮助他们去做这件事。本书还将使那些非专业的读者获得有关地热能的广泛的一般概念,特别是那些与地热有关的专业概念。

本书的各个章节都分别由各专业人员撰写。这些专业人员和他们的同事之间在某些工作上,是互相交织在一起的,以致不可能把每门学科绝然分开,一定程度的重复是不可避免的。例如地质工作者和地球物理工作者在某些方面就得依赖地球化学工作者的研究工作,没有地球化学方面的一些资料,他们都不可能对自己的研究成果作出恰当的解释。不过,这种重复将限制在各个标题得以成为独立的章节,并足以表达该章节所需要说明的主题的范围以内。

凡是对本书的某一章的内容发生相当的兴趣,而又打算进一步探求这方面知识的读者,可以参看大量的参考文献。本书几乎在每一章之后都列有参考书目,这些参考书有许多往往又进一步引出其它参考书,这样就可以引导读者的研究向他们所希望的广度和深度进行下去。

直到今天,还有人认为地热能的某些方面是异想天开和办不到的事情。本书将纠正他们的这种印象,并说服读者:经济地开发地热能已不再是梦想,而是已经建立起来的生活现实之一。

第一部分 概 论

什么是地热能?

H. C. H. 阿姆斯特德 (英国)

一、地热能的性质和产状

就在不久以前,地热能还仅仅被人们看成是大自然的一种有趣的恶作剧,还只能以间歇泉、喷气孔和沸泥塘等形式吸引着游人,实用方面只限于治疗各种疾病,某些偏远地区则用它进行天然热浴。现在,这样的时代已经过去。地下热在许多应用方面已经成为其它类型能源的无可置疑的商业性竞争者。

虽然,我们对于外层空间的情况正在迅速地熟悉起来,然而直到现在,对于我们脚下、二哩以内所发生的事情却惊人地无知。早在1904年,英国工程师C. 帕森斯曾经建议凿一口深入地球12哩的竖井,以便在某种程度上补救这种无知。他估计将耗费500万英镑,当时这是一笔很可观的数字,而且需要85年的时间才能建成。被帕森斯不经心地命名为“地狱火勘探计划”的这个建议一直也没有执行过。

大家都知道地球下面是很热的,但是世界上大部分地区所观测到的地球外壳的温度梯度平均每深100呎却只增加 1°C 左右。根据这一温度梯度,帕森斯期望在他的竖井的底部能遇到 600°C 或 1100°F 的温度。

地球某些地区的温度梯度是很陡的,有时甚至比正常的高出100倍。这类地区的热便称之为“地热能”。这种热区域虽不永远但却经常和火山活动及地震活动紧密相关。从E. 布拉德所绘制的图(本书17页图9)上,一眼就可以看到世界上主要地震带的分布情况。图上的圆点和十字表示1960—1967年间实际记录到的地震,圆点代表浅震,十字表示深震。其中绝大多数都明显地发生在宽度比较窄和具有清楚界限的地带或地区以内。地震带的最重要部分大体分布在太平洋的周围,其中也包含大量的活火山和死火山,这就是有名的“火带”。另一个重要的地震区沿大西洋的中间分布。它有一条分支向东穿过地中海、中东,直到中国的西藏。还有一个重要的地震区大致上沿非洲大断裂谷和红海分布,所有这些地带都相互连通。只有夏威夷群岛是一个小小的孤立的集中的地震区。

地热区一般总是在这些地震带内出现,但不一定靠近火山。例如意大利的拉德瑞罗和加利福尼亚的盖瑟尔斯两个最著名的地热田都离最近的火山相当远。但是,有的地热区也出露在地震带以外,如:肯尼亚、匈牙利和苏联的一些地区。虽然是这样,最“壮观”的地热区仍然处于地震带以内。因此,虽然地震区并不掌握地热勘探的“专利权”,但我们仍然可以把它看作是地热勘探的最有希望的地区。遗憾的是,地震带的相当大的一部分都在海下。

为了解释地热的来源和向上向地表传输的机制,曾提出过各种各样的理论和模型。地下到底发生着什么?还存在许多揣测。但是,这个奥妙已逐渐被揭露。现在几乎已经公认:地热真正的主要来源是存在于地壳岩石中的放射性活动。另一方面,“大陆漂移”说为地震在大范围内的显而易见的带状分布提出了一套有趣而又似乎有了解释。在这些地震带以内,地壳的薄弱性使深部的热能够上升到地表附近。一些时候以来,一直有人建议在地壳最薄的地方,即海洋最深部分的海床上,钻进7哩左右,打穿地球的外壳与下部热地幔之间的莫霍洛维奇界面,这就是所谓的莫霍计划。这项工作可以称为一个新的有限的“地狱火计划”。它的耗费将比C.帕森斯的计划超出7—8倍。不幸的是,“莫霍计划”也一再受到搁置。人们期望“莫霍计划”的最终完成将有可能较多地揭示地幔层的真正性质,并将极大地增进我们的关于地球内部所进行的“工作”的知识。

目前,能够被大家所接受的一个简单的事实是:在世界的某些部分,大自然为我们提供了大量的容易得到的地热能。

二、地热开发的历史

人类企图利用地热是不足为奇的。古代的罗马人和现代的冰岛人、日本人、土耳其人以及其它民族早就用它来洗澡和采暖。新西兰的毛利族也开发了天然热来满足他们的家庭需要。在新西兰可以看到关于利用地热的很有趣的情景,在北岛罗托鲁瓦附近的一个毛利人的村庄里,渔民把捉住的鳕鱼放在沸水塘烹调,几码以外,他的妻子在给婴儿进行地热浴,他的女儿在从事家庭洗涮,同时在喷汽孔上蒸煮马铃薯。

在托斯卡纳的拉德瑞罗,意大利人从十八世纪起就已经由喷汽孔里提取硼酸,地热发电也是在这里首先取得成功的。早在本世纪开始以前,就有人企图利用天然蒸汽驱动往复机。现在,拉德瑞罗地区的一组地热电站的总出力已经达到39万瓩。巨大的荣誉应该归于发展地热发电的先驱者意大利人民,他们的成就是鼓舞其它人的源泉。

世界各地利用地热蒸汽发电作为公用电力供应的容量已经超过70万瓩(见表)。加上正在建造的地热电站,总容量将在很短的时期内接近90万瓩。

地热发电一览表

装 机 地 点	截至 1971 年的装机容量,瓩	正在建造的容量(瓩)
意大利,拉德瑞罗电站组	39 万	—
新西兰,怀拉开	19.2 万	—
加利福尼亚,盖瑟尔斯	8.2 万	11 万
日本 { 大岳	1.3 万	
松川	2.0 万	
冰岛,纳马夫加尔	0.3 万	
苏联,鲍惹茨卡	0.5 万	
墨西哥,墨西哥卡利	—	7.5 万
	70.5 万	18.5 万
总 计	89.0 万	

新西兰人有一个开发布罗德兰兹新热田的提案性计划。加利福尼亚也正在考虑进行

大规模的开发。世界地热发电的装机容量将很快超过 100 万千瓦。

在发展发电的同时,地热能也广泛地用于采暖和工业供热。

还有一些国家对发展地热采取积极关心的态度。联合国资源和运输分部已经向不下十九个国家提供了有关地热开发方面的技术咨询。另外,联合国发展方案*在它的特别基金范围内,已经有了土耳其、萨尔瓦多、智利、肯尼亚和埃塞俄比亚等五个国家的地热勘探计划。菲律宾政府也提出了类似的申请。其它国家也对地热开发的可能性产生了浓厚的兴趣。

三、地热能的应用

我们从上面所说的可以看到,生产电力是地热能迄今最重要的应用方面。这是很容易理解的,因为地热田一般都出露在偏远地区,由于电力能够长距离输送,所以它能在相当大的程度上抵销热田出露地点偏僻的不利因素。电力可以在地热田就地生产,再输送到远方的居民中心。而地热电站又能在较高的负荷因数下提供极其便宜、非常可靠的基本负荷。它不受降雨多少、季节变化以及白天和晚上的影响,能够一直稳定地保持自己的发供电能力,这一点就比水电优越。

地热能未来的最重要的应用方面可能还是生产电力。但是,这种形式的能量怎么用都行,不可能把它局限在某一种用途上。地热能已经广泛地用于区域供热,特别是在冰岛。冰岛和苏联的部分地区的气候条件过于恶劣,一般难以维持正常的耕作,但利用地热加热温室,就可以栽培蔬菜和鲜花。地热还用于一些大量用热的工业部门,如新西兰用地热造纸,冰岛用地热来回收和加工硅藻土。新西兰还成功地利用地热进行空气调节。意大利在十八世纪就建立了利用地热生产硼砂的工业,至今仍然持续生产。

然而,地热能目前的很有限的几个应用方面并不充分反映它在工业及其它应用方面的无限潜力。H. C. H. 阿姆斯特德和 S. 艾纳森为本书撰写了一章,专门论述地热能应用方面的发展远景。

在不久的将来,人类最紧迫的需要可能是淡水。地热脱盐在为某些地区供应廉价淡水方面提供了很大的希望。但是,这类地区的选择将明显地受到热田出露位置的限制。

已知某些地下热水含有小量价值很高的矿物成分。这些矿物的提取是完全可能的。浓度低是缺点,但可以从含矿水的高产量得到补偿。加利福尼亚的索尔顿湖地区引起了人们的极大的兴趣。已经查明:该地区的地热卤水中含有许多贵金属。

由于地热能能在工业及其它应用方面具有广泛的潜力,所以如果能结合发电,兴建两种或多种目的的地热综合利用工厂,就可以获得巨大的经济利益。这种工厂将能使勘探性钻探费用及某些其它开支由两种或多种终端产品来分担。

发电虽然一直是开发地热田的主要理由,但重要的是:计划人员对于上述其它广泛的应用潜力绝不应该一无所知。

四、地热发展的障碍

凡是已经得到开发的地热区,都能证明地热能是何等便宜,但令人惊讶的是,截至目

* United Nations Development Programme 是联合国经社理事会下属的一个机构。——译者注

前为止,地热开发的进展却是缓慢的,许多地热田一直受到忽视。原因很清楚,即并不是所有的地热田都能必然地得到经济的开发。为了证明一个地热田是否宜于投产,就必须首先付出十分巨大的勘探费用。如果勘探的结果是肯定的,勘探费用就被证明是正当的;如果勘探结果是否定的,则将是一个巨大的浪费,所剩下的将只有纯科学上的意义。

如同石油勘探一样,地热勘探费用也可以看作是“冒险性投资”。但对石油勘探来说,如果它取得成功,石油产品就可以装船销售到全世界,而不必耽心油田的位置如何。至于地热田,即使它取得成功,它的能量也只能就地使用,或者在有限的范围内使用。可能性最大的市场是电力供应,但电力供应可以通过传统的途径得到发展而无须什么“冒险性投资”。由于在资本主义国家中,公办企业的电力一般没有多大利润,而私营电力工业的利润也只中等,因此,当电力工业的发展途径可以有所选择,而又存在财政上较为安全的路线时,一般总是选择比较安全的路线,对“冒险性投资”的刺激性就变得很小了。

因此,不情愿参与很费钱的地热勘探计划的这种现象,是由于存在既要“冒险投资”又要“安全发展”这两种哲学之间的不可调和的矛盾。然而,成功地开发地热田所带来的经济利益可能是如此地大,以致于我们满怀希望去找到某些途径来弥补这两种哲学间的缺欠。

由于上述原因,联合国发展方案才提供大量的服务工作。这个方案的特别基金组织专门从事那些投资前的工作,以解除委托人政府感到花费不起的某些冒险性。前述五个国家的地热勘探计划是联合国发展方案所从事的第一批这样的工作。执行过的几个计划取得了很有希望的结果。这个事实又鼓舞了下一步的勘探工作。当然,由于工作还刚刚开始,要断定这些勘探计划的前景,为时尚早。

某些比较发达的国家感到有信心承办他们自己的地热勘探工作,而无须任何国际组织的帮助。如意大利、新西兰、加利福尼亚和墨西哥已经做了他们自己的工作。刺激他们这样做的原因是这些国家有比较吸引人的,容易得到开发的地热能源,而对这种能源又能采取“从牛奶里撇取奶油”的办法加以利用,因此不得不对这种不一般的能源给予更多的考虑。

五、地热的展望

如前所述,世界现有的几十万瓩的地热发电量,只不过是世界总发电量的很小一部分。在未来的十年左右的时间里,地热电站的数目可能会增加得很快。但必须承认:在可以预见到的将来,地热能所提供的电力将仍然是总电力中的很小一部分。虽然如此,对某些发展中的国家来说,地热发电的相对重要性将给人以很深刻的印象。地热能工业和其它方面的应用也是一样。因此关于这种能量的近期和中期前景,尽管重要,也不应该过分夸大。

地热能的远景可能是非常惊人的,因为我们将拥有地球内部所蕴藏的巨大能量,它将使我们想象当中所能掌握的一切能源黯然失色,而变得微不足道。当然,问题在于如何去开发它。因为大自然只允许很小的一部分热量外逸到地表附近。目前,地热的开发还仅限于热异常区,即向下的温度梯度大大地高于每深100呎平均增温 1°C 的地区。在非异常区的地下还蕴藏着无限的热量,但埋藏太深,以致用现有的方法不可能进行经济的开发。

然而情况不会永远如此。可以证明：如果整个地球降低 1°C ，那么所放出的热量，如以现在的耗电水平计算，就足可维持全世界4000万年的电力需要。当然这并不是说我们将认真地把地球冷却 1°C ，那怕是百分之一度，因为这么做，单单地震和气候的后果就能够造成灾难。但是可以想象，随着时间的推移，我们总能找到一些办法，或许能够借助于地下核爆炸，以一种能够接受的投资和在这种投资能够得到补偿的条件下，去穿透某个距离而到达岩浆。依靠这种办法，我们或许能够在一些较大的局部集中的地区，至少开发出庞大能储的一小部分，而且地区的选择还可以结合海水来考虑。这样，我们将能“一劳永逸”地解决人类的能源问题和淡水问题，并且把伴生的污染问题降到最低限度。

这些都可能被看成是幻想。但是仅仅在20多年以前，空间旅行不也被看成是幻想吗？我们不妨设想：如果能把迄今消耗在空间考察上的浩繁花费改用在方向向下的活动上，难道不可以得到远为巨大得多的报酬吗？

基 本 理 论

E. 布拉德(英国)

一、引 言

本章将扼要地介绍地球结构和地球内部进行的各种过程，特别是热的产生和传输过程。就在最近几年，地质学发生了一次重大的革命，这个革命发展了有关地球的历史和地球内部运动性质的新概念，并被广泛接受。本文采纳了一些比较成功的新观点，即为传统观念辩护的陈旧观点在每一个问题上都无法解释的那些观点。简单说来，传统观念认为地壳的巨大块体没有发生过很大的水平运动，而整个深达 3000 公里的地球外部是一个本质上只存在垂直运动的固体。这种观点曾为别洛乌索夫^[1]和杰弗里斯^[4]巧妙而又详尽地说明过，但本文将采用另外的观点。

二、地壳、地幔与地核

在地球的表面可以见到各种各样的岩石，有时是沉积岩，如粘土、砂岩或石灰岩等；有时候是大部分由花岗岩组成的古老“地盾”；而另些时候可以见到从火山流出的熔岩。沉积岩在地质上非常重要，它包含着石油的全部以及地球矿物资源的大部分。沉积岩还含有化石，我们有关地球历史的知识主要依赖对化石的研究；然而，对于本文的目的来说，沉积岩没有多大意义。

大陆沉积物的下面是一个主要由花岗岩组成的“基底”。某些花岗岩是由熔融物质冷凝形成的，有些花岗岩却是由于受热，以及下面的液体和气体上升致使沉积物变质而成的。花岗岩是热力作用、机械作用和化学作用的综合产物，并具有不同的化学与矿物成份。一般来说，花岗岩代表低熔点物质，并含有大量以结晶石英形式出现的游离二氧化硅。这种物质以不同的方式从地球较深处的比较基性的岩石（即含石英比较少的物质）中分离出来。比较基性的物质通常以切割花岗岩的玄武岩墙形式出现于接近地表的地方。岩墙是向上贯入并固结而成的火成岩垂向岩席。

玄武岩的比例似乎随深度而增加。在某些地方，花岗岩的下面可以是质地很纯的玄武岩层。地震弹性波的研究表明：在大陆下 35 公里深处有一界面，称为“莫霍洛维奇间断面”，简称“莫霍面”。它是根据发现者 A. 莫霍洛维奇得名的。在莫霍间断面上，地震波速突然增加。对压缩波来说，波速约从 7 公里/秒增至 8.1 公里/秒。莫霍间断面代表构成地球“地壳”的花岗岩和玄武岩的下界。大陆上的山系是由沉积物质组成的，这些沉积物曾经遭受挤压、受热和变形，并有来自下部的熔融岩石的侵入。我们所见到的山脉的形状乃是这类物质被流水和冰川改造的结果。

海洋中的情形则全然不同。洋底是一个新的地质世界。所有岩石都是玄武岩；无论是在海底之下，还是在岛群之上，都没有花岗岩(少数几处“大陆碎块”和“花岗岩碎片”除外，前者如塞舌尔群岛，后者如阿森松岛；阿森松岛上所见到的花岗岩碎片是由巨大的熔融态玄武岩体分离出来的矿物形成的)。如同大陆上一样，海洋中的莫霍间断面也位于玄武岩之下，但它仅在洋底以下约 5 公里，即海面以下约 10 公里的深处。图 1 表示大陆地壳与海洋地壳的结构。海洋山脉并不是由褶皱岩层改造成的，而是一些火山。当它露出海面时，往往被珊瑚礁所覆盖，但在珊瑚礁下面，却总有由玄武岩组成的火山核。

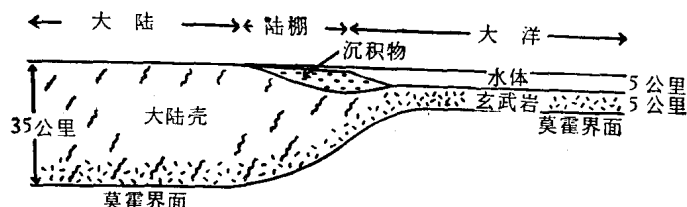


图 1 非活动性海岸(如北美东部海岸)的地壳概略剖面
大陆下面的玄武岩比例可能随深度而增加,但不一定形成一个独立的玄武岩层,陆棚下面的沉积物厚度通常很大

地壳之下为“地幔”。对诸如地震波传播过程中的那种持续数秒钟的作用力，地幔物质表现为固体。在周期达 1 小时的地球天然振动中，对 12 小时的潮汐周期和地球围绕旋转轴所发生的摆动(周期约 1 年)来说，地幔也表现为固体。如同所有固体在温度超过数百度时所表现的那样，地幔在漫长的地质过程中也可能发生‘蠕动’。在长期的连续作用力的作用下，地幔性状最直接的证据是先前曾遭受冰川作用的隆起地区，如冰退后的斯堪地纳维亚半岛。这种隆起需时约 10000 年，并且和类似流体的上地幔物质相一致，其粘滞度为 10^{21} 克/厘米·秒。关于上地幔，曾经有过许多类似流变学的讨论。特别是关于它是否存在一个有限的‘强度’，低于这个强度，上地幔就不再发生流动。我们认为，对于周期为 1 天的过程来说，上地幔乃是甚‘佳’的固体，它‘响若钟鸣’，而对于周期超过 10000 年的运动来说，上地幔表现为‘牛顿流体’，只要有稍许应力差，它就将开始运动^(6,4)。对于周期介乎 1 天和 10000 年之间的运动来说，上地幔的性状无疑是复杂的：其下部可能是具有某种不完全弹性的固体；其上部也许是一种有效粘滞度随应力而变的液体。

地幔物质不能直接观察到。我们有关地幔物质的知识部分依赖于对地震波速的推论，部分依赖于对那些或多或少被设想为直接来源于地幔的地表岩石的研究。由于海洋中地幔埋藏浅，所以海底岩石的研究特别重要。目前一致认为，在莫霍面的上下，物质成分发生了显著的改变。莫霍面下的物质属超基性成分，即主要由橄榄石[铁镁正硅酸盐矿物， $(Mg, Fe)_2SiO_4$] 构成的橄榄岩。其成分可能和石陨石的成分十分相似。

在地幔中，压力与温度都随深度的增加而增加。而在某一深处可望发生晶体结构的改变。地震学认为，在深度为 400 公里附近有一渐变，这一渐变可能和实验室中观察到的高压下晶体结构趋于更紧密的变化相一致。在转变过程中粘滞度可能大大增加。但是，关于这种变化的定量概念的直接证据很少。

地幔延深约 2900 公里。2900 公里以下便改变为更加致密的液态的地核。很可能大部分由熔融铁所组成。液态地核的内部是一个半径约 1350 公里的‘内地核’，后者也许是