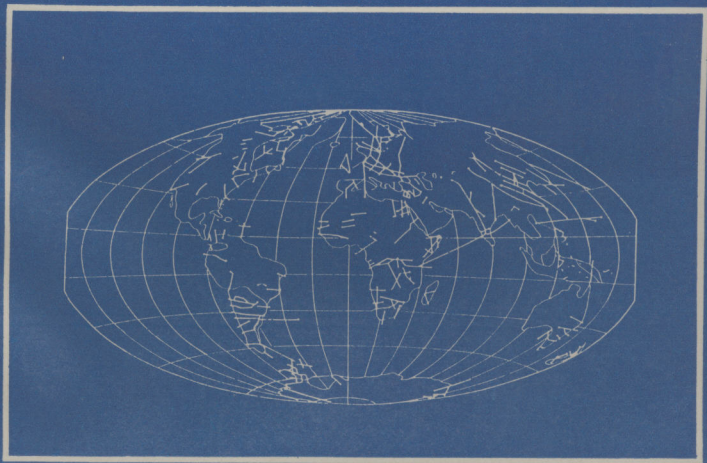


“油气藏地质与开发工程” 系列丛书
国家重点实验室

深部地质与地球物理 探测现状与发展

周济元 林盛表 库成荣 编



地质出版社

深部地质与地球物理探测现状与发展

周济元 林盛表 库成荣 编

地质出版社出版

(北京地质研究所编)

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

地质出版社

1889
34
(京)新登字 085 号

内 容 提 要

本书系统详细地介绍了当前国际有关全球地质(尤其是深部地质)、深部地球物理探查、超深钻等的调查的计划、内容及所取得的成就。其中对当前流行的地体构造、推覆构造、薄板构造、滑动构造、伸展及裂谷构造、韧性剪切带等构造学说进行了介绍,对研究深部地质问题的人工爆炸地震、天然地震、地磁、重力、地电、地热、遥感等方法的新技术及所取得的成果及世界超深钻探成果与问题都作了综述。

本书内容取材较新、面广,引用的实例都是本世纪 80 年代以来全球各大洲的最新成果,是有关研究深部地质、了解深部地球物理方法效果的一本情报专著。其特点是概念准确、地质与物探紧密结合。可供从事地质、地震、矿产勘查等工程技术人员参考,同时也是地质各专业的高年级学生和研究生的一本良好参考书。

图书在版编目(CIP)数据

深部地质与地球物理探测现状与发展/周济元等编. -北京:地质出版社,1994.11
(“油气藏地质与开发工程”国家重点实验室系列丛书)

ISBN 7-116-01784-4

I. 深… II. 周… III. ①地质勘探-概论②地球物理勘探-概论 N. P631

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 14133 号

地质出版社出版发行

(100013 北京和平里七区十号楼)

责任编辑:关山 赵俊磊

中国地质科学院 562 印刷厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本: 787×1092¹/₁₆ 印张: 10.375 字数: 250000

1994 年 11 月北京第一版·1994 年 11 月北京第一次印刷

印数: 1—800 册 定价: 9.00 元

ISBN 7-116-01784-4

P·1422

前 言

地球深部地质问题(地壳、上地幔内部物质分布、构造的形成与演化)是当今人类了解较少但为人们关心,并为科学界争论的热点之一。然而,要了解地球深部的物质组成、构造形态与分布及演化历史并非易事,目前只有用深钻、超深钻及各种地球物理方法才能获得部分直接的、间接的资料或证据。本书根据全球 20 世纪 80 年代以来地质学家、地球物理学家用各种地质学方法、各种地球物理学方法、钻探方法所获得的各种证据、资料,介绍了目前地壳、上地幔的物质组成、构造分布与演化过程,是目前国内外较为翔实、系统的研究深部地质与地球物理探测成果的专题情报资料。

本书是原地矿部物化探局为配合我国深部地质-地球物理调查而设的情报调研课题,其中“构造地层地体”是核心内容,“地体”情报对当时的地学大剖面课题研究起了良好的作用。

该调研报告几经修改、补充,成为现今的《深部地质-地球物理研究现状》书稿,并被编为“油气藏地质与开发工程”国家重点实验室的系列丛书之一。

该书的编写计划、提纲是由周济元、林盛表、庠成荣共同拟定的,并共同收集资料。其中第一章、第三章由周济元执笔编写,第二章由林盛表、庠成荣编写、周济元修改、补充。前言、第四章、结束语由林盛表执笔编写。第五章由庠成荣编写。侯秀萍同志为本书编写提供了前期的文献服务,全书图件由王霞清绘。最后全书由林盛表统编。

目 录

1. 国际岩石圈计划的成就和发展动向	(1)
1.1 国际岩石圈计划	(1)
1.2 岩石圈探测	(2)
1.2.1 全球地学断面 (GGT)	(2)
1.2.2 COCORP——大陆地震反射剖面	(5)
1.2.3 下地壳	(6)
1.2.4 科学钻探	(6)
1.3 岩石圈动力学	(16)
1.3.1 世界地应力图	(16)
1.3.2 板内构造	(21)
1.3.3 古重建图	(21)
1.4 全球变化	(22)
2. 构造地层地体	(23)
2.1 地体概念的形成及其意义	(23)
2.1.1 地体概念的形成	(23)
2.1.2 地体的定义	(27)
2.2 地体的分类	(27)
2.2.1 地层地体	(28)
2.2.2 分离地体	(28)
2.2.3 变质地体	(28)
2.2.4 复合地体	(29)
2.3 地体的形成和发展	(29)
2.3.1 地体的形成	(29)
2.3.2 地体的演化	(37)
2.3.3 大陆形态及其变化	(38)
2.4 地体研究的步骤和方法	(39)
2.4.1 地体研究的步骤	(39)
2.4.2 地体研究的方法	(39)
2.5 地体与矿产	(43)
2.6 我国地体研究	(44)
2.6.1 中国可疑的外来岩块	(45)
2.6.2 中国东南部的地体构造	(47)
2.6.3 西藏地体构造	(51)
2.6.4 其他地区	(60)
2.7 环太平洋的地体	(60)
2.7.1 北美	(60)

2.7.2	阿拉斯加和不列颠哥伦比亚	(60)
2.7.3	美国西部	(62)
2.7.4	南加利福尼亚	(63)
2.7.5	南美	(64)
2.7.6	西伯利亚东北部	(65)
2.7.7	中国	(66)
2.7.8	澳大利亚和新西兰	(69)
2.7.9	大洋高原	(69)
2.7.10	大陆生长和形成	(70)
2.7.11	结论	(70)
3.	几种新构造观点的介绍	(72)
3.1	推覆构造	(72)
3.1.1	推覆构造研究概况	(72)
3.1.2	有关推覆构造的概念	(73)
3.1.3	逆冲推覆构造的研究意义	(75)
3.2	拆离(滑脱)构造	(77)
3.3	薄皮构造、厚皮构造	(80)
3.3.1	薄皮构造概念及研究进展	(80)
3.3.2	薄皮型褶皱-冲断带	(81)
3.4	地壳伸展及裂谷构造研究的进展	(84)
3.4.1	地壳伸展及裂谷构造研究概况	(84)
3.4.2	伸展构造类型	(85)
3.4.3	伸展构造模式	(88)
3.4.4	我国伸展构造的研究实例	(88)
3.5	重力滑动构造	(89)
3.5.1	重力滑动构造研究概况	(89)
3.5.2	重力滑动构造的组成及特点	(90)
3.5.3	重力滑动构造型式及形成条件	(91)
3.5.4	重力伸展	(91)
3.6	韧性剪切带	(92)
3.6.1	剪切带的研究概况	(92)
3.6.2	韧性剪切带的概念	(93)
3.6.3	剪切带的类型	(97)
3.6.4	我国韧性剪切带研究现状	(98)
4.	地球物理方法在深部地质问题研究中的应用	(100)
4.1	人工爆破地震	(100)
4.1.1	概述	(100)
4.1.2	技术进展	(101)
4.1.3	主要成果	(101)
4.2	天然地震观测与CT技术	(109)
4.2.1	概述	(109)
4.2.2	计算机层析成像技术	(110)

4.2.3	CT 技术应用实例	(111)
4.3	地磁场测量及应用	(114)
4.3.1	航空磁测的效果	(114)
4.3.2	海洋磁测	(120)
4.3.3	古地磁在岩石圈构造演化研究中的应用	(121)
4.3.4	卫星磁测在研究深部地质问题中的应用	(124)
4.4	地电方法	(125)
4.4.1	地面电法	(125)
4.4.2	海洋电法	(130)
4.5	重力场测量	(131)
4.5.1	对裂谷的研究	(131)
4.5.2	利用卫星重磁场对中国大陆分区	(133)
4.5.3	岩体(层)与构造的划分	(133)
4.5.4	重力场在地体研究中的应用	(137)
4.6	遥感技术	(137)
4.6.1	概述	(137)
4.6.2	遥感测量与地质系统的形成	(138)
4.6.3	遥感技术在深部地质研究中的应用	(139)
4.7	地热测量及其在深部地质构造研究中的应用	(141)
4.7.1	概述	(141)
4.7.2	地热研究在解决地质问题中的新进展	(141)
4.7.3	我国主要地质构造单元的地温场特征	(142)
5.	地球深部地质、地球物理探测发展趋势及对我国今后工作建议	(148)
5.1	地壳深部地质研究的发展趋势	(148)
5.1.1	全球深部地质的研究越来越受到重视	(148)
5.1.2	地球深部研究的国际合作进一步加强	(149)
5.2	大陆科学钻探的发展趋势	(150)
5.2.1	超深钻的研究方向和研究内容不断扩大	(151)
5.2.2	大陆钻探与海洋钻探相互配合	(152)
5.2.3	科学钻探的发展趋势	(153)
5.3	国际大陆钻探计划(ICDP)的框架构想	(153)
5.4	关于我国大陆科学钻探的建议	(154)
5.5	地球物理学理论和方法的发展趋势	(155)
5.5.1	发展趋势	(155)
5.5.2	加强横波地震方法研究的建议	(156)
5.6	对我国深部地质工作的建议	(157)
5.6.1	积极开展大陆科学钻探的前期准备	(157)
5.6.2	开展综合性的调查研究	(157)
结束语		(159)

1. 国际岩石圈计划的成就和发展动向

1.1 国际岩石圈计划

国际岩石圈计划 (ILP) 是继国际地球物理年、国际上地幔计划、国际地球动力学计划之后的又一个国际合作计划。由联合会间岩石圈委员会 (ICL) 组织实施, 是 20 世纪 80 年代地质学的前沿课题。它主要研究岩石圈的构造、成分、演化和动力学, 其目的是寻找矿产资源、预防地质灾害和进行环境保护。研究的问题是全球性和多学科的, 也是异常复杂的。因此, 只有全球的, 包括发展中国家在内的地质学家、地球物理学家、地球化学家、技术界、工业企业界及有关学术界的专家们的联合参与与密切合作, 采用最先进技术方法, 积极探索才能解决, 并取得突破。

该计划于 1981 年由加拿大 R. A. 普顿斯任主席, 美国 E. A. Flinn 任秘书长领导下制订的。在实施的第一个五年计划内, 成立了 9 个工作组和 8 个会间委员会, 以保证岩石圈计划的实施。该计划极重视研究和解决以下问题:

1. 200Ma 前岩石圈的成因与演化;
2. 大陆及其边缘的构造、物性、成分与动力学;
3. 大陆与大洋岩石圈之间的差异;
4. 寻找新的资源;
5. 评价、预测与减轻自然灾害及由人类活动引起的地质灾害。

为了实现上述目标, 国际岩石圈委员会特作出了以下规定:

1. 对某一重要假说将起到决定性的检验作用;
2. 能缩小知识方面的重大差距, 或者是;
3. 它可能开拓了解岩石圈新领域的途径。

并且制定了共同遵守的准则:

1. 实现地质学家、地球物理学家、地球化学家和大地测量学家之间的不同学科的合作;
2. 必须实现国际合作;
3. 加强从事基础研究与应用研究的地球科学家之间的合作与交流;
4. 重视和加强发展中国家的地球科学研究。

20 世纪 80 年代初, 通过各种大型地球科学会议和专门会议安排专题讨论会和座谈会, 并通过若干意义明确的课题实施来达到上述目的。在 ICL 领导下, 总结了前五年取得的科学成果, 出版了各种杂志专著 25 本, 由美国地球物理联合会出版了 8 张黑白图: ①根据古生宙的古地磁进行板块重建; ②1986 反射地震学; 全球透视图; ③反射地震学; 陆壳图; ④中生代与新生代海洋图; ⑤岩石圈—软流圈的结构构造及动力学特征; ⑥元古宙岩石圈演化; ⑦环太平洋造山带和太平洋盆地的演化图; ⑧近期板块运动与形变。

经过五年计划的实施, 1985 年于东京召开的国际岩石圈委员会上认为, ICL 机构应该

改组,将工作组和会间委员会都减少到6个。同时,德国K. Fuchs当选为ICL主席,荷兰H. J. Zwart当选为秘书长。ICL实施第二个五年计划,ICL执行的二个主要领域内重要课题的长远计划进行实施,包括:

1. 岩石圈探测,包括:①全球地学断面(GGT);②大陆反射地震剖面(COCORP);③下地壳;④大陆深钻。

2. 岩石圈动力学,包括:①世界应力图;②陆内构造(实时大地构造学、世界活动断裂图、大陆裂谷作用);③计算机层析技术(CT);④古再造图。

1.2 岩石圈探测

地球科学的前沿课题之一——岩石圈联合探测,实施了以下计划:

1.2.1 全球地学断面(GGT)

全球地学断面计划(GGT)是国际岩石圈计划的一个重点项目。GGT计划的重点是沿断面线范围内的地质、地球物理和地球化学资料都综合在一张图上,以得到一个解释性地壳断面。该断面实际上是地壳垂向的大地构造图,反映该断面地壳起源和演化。

地学断面按统一格式编制(图1-1),以便于进行全世界各地所得结果的对比。它要求打破学科界限,将整个地学各分支学科的认识集中到同一张断面中进行统一解释。

GGT计划与深部调查计划即有联系又有区别。许多国家都制订了耗资巨大的深部地球物理调查计划。而GGT计划与其不同之处在于十分强调综合探测与综合研究。

GGT计划始于1985年8月,止于1988年10月,各国提出的地学断面列入目录的总数达175条(图1-2)。其中非洲41条,南极洲14条,北极1条,澳大利亚及新西兰11条,中国及日本18条,欧洲9条,印度3条,中东16条,北美12条,南美30条,东南亚1条,原苏联12条。

GGT计划是在北美陆-洋断面(B₂剖面)计划之后,于1985年由ICL提出,并正式实施的项目。因GGT包含了国际岩石圈计划已建立的许多基本原理,因而便成为ILP的主要项目之一。

“TRANSECT”一词是指可显示地壳结构及组成的横断面,还可显示岩石圈底部特征并综合所有地质、地球物理、地球化学资料而建立的岩石圈断面图。这种断面必须穿过重大地质构造单元,如造山带、地堑、沉积盆地、地震和火山等灾害活动危险地带。当然,GGT不是数据的堆积,而是要解释深达莫霍面,甚至软流圈以上的横断面,所以,它实际上是一个地壳、岩石圈的垂直构造图。

每条地学断面必须包括以下内容:

1. 比例尺为1:50万或1:100万,宽100km的走廊式地质区带图,重力和磁力区带图;

2. 数据显示:包括地质断面、重磁剖面、地震反射、折射纪录以及其它有关数据;

3. 表明由地表地质决定的地壳演化时空图;

4. 建立一个地球物理解释的综合模型;

5. 综合一个地壳模型所有特征的断面解释图。

在我国除上述内容外,还进行了地热流剖面、大地电磁测深、地磁差分方面的探测。

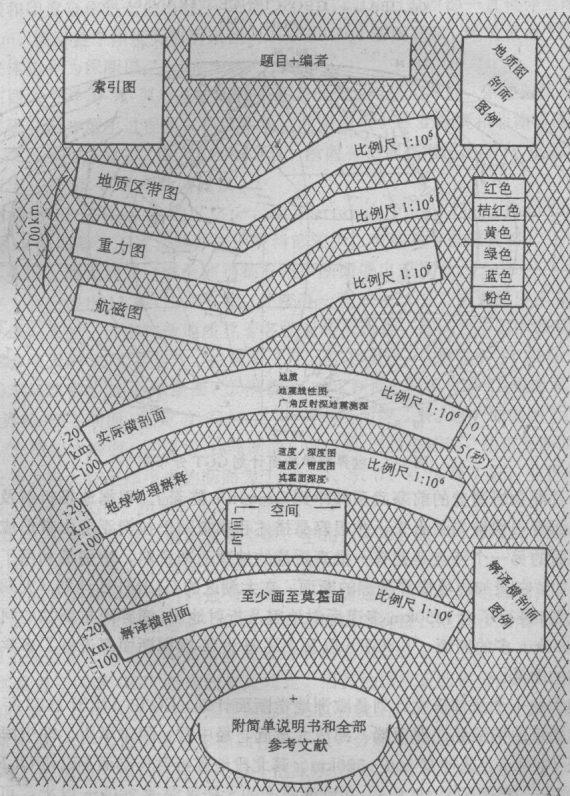


图 1-1 全球地学断面计划的典型格式

(October, 1988)

GGT 在 J. Monger 领导下，成立各种专门队伍，遍布于全球，已成为一项真正国际性、跨学科的研究项目。在实施过程中进行过三次展示：第一次在巴西贝论；第二次在中国北京；第三次在美国华盛顿。在 1989 年 7 月 28 届国际地质大会上，GGT 的活动很受与会者们欢迎和赞扬。来自世界各国近 50 条断面参加了展示，其中 29 条剖面作了报告。

北美魁北克-缅因-缅因湾断面是最现代化的。它率先将断面实现了全面数字化，存入数字光盘 (CD-ROM)。在 10km 以上的构造可以很快成像，包括岩基的形状，含磁黄铁矿炭质变质泥质岩的褶皱，魁北克 Connecticut Valley-gaspe 复向斜和中缅因 Merrimack 复向斜盖层与基底间的关系，以及主要逆掩和走滑断层，也可看到中地壳的细节。例如，寒武纪、奥

GLOBAL GEOSCIENCE TRANSECTS October 1988

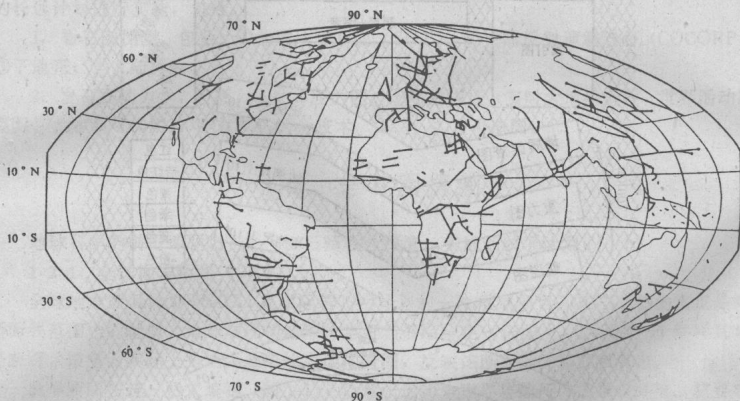


图 1-2 世界地学断面计划 GGT 分布图

陶纪蛇绿岩及混杂岩覆盖的前寒武系仰冲到 Grenville 陆壳上。根据地震折射及地震反射的结果，莫氏面可很快被勾画出来，并很容易描述和模拟阿巴拉契亚造山带形成过程。

北美剖面的另一个特点是拥有一批高质量的地球物理资料，特别是利用了许多陆壳反射资料。例如，在美加边境横穿美洲的断面，在大湖区的 GLIMPE 计划（大湖地壳演化国际多学科计划）进行了近 1350km 多道反射地震及折射地震。横穿阿拉斯加的阿拉斯加湾到北冰洋的 1000km 多的断面（TACT）以及上述魁北克-缅因断面都进行了多学科和包括地震反射在内的测量。

欧洲最大的一个深部研究计划是欧洲地学断面计划（EGT），始于 1983 年，止于 1990 年。断面自斯堪的纳维亚北部顶端、挪威北角起，经中欧、阿尔卑斯、地中海至北非南突尼斯，全长 4000km，区带宽 200—300km。其北段地震折射长剖面 FENNOLRA，接收距离长达 2000km，穿透深度 450km。在欧洲最老的大陆区深达 200km 以上，可分解为若干高速带和低速带，下部岩石圈不均匀，上地幔中有一连续低速层，认为是软流圈。在 450km 处有一不连续面，认为是橄榄岩/尖晶石转换面，其中海西褶皱带的地震反射剖面可见 Moldanubiant 和 Caxothuringian 两构造单元间的关系是中地壳内倾向南西的反射面。

原苏联叶高尔金（Ydgorkin）等人根据区域地球物理资料对全苏深部构造进行了研究，联合解释了不同类型的波： V_p/V_s 值及转换波，并以此详细划分了地壳和地幔。年轻板块和褶皱区， V_p/V_s 值随地壳厚度增大而减小；古板块，则随地壳厚度增加而加大。岩石的 V_p/V_s 与 SiO_2 含量的关系说明， SiO_2 含量不随深度增大而减小，陆壳主要由长英质和近长英质组成，所谓“玄武岩层”实质上是存在的。在地幔内有多低速层。西伯利亚有的有四个低速层（70—80km、90—100km、140—160km 和 205—275km），不存在区域性分布的软流层。在构造活动区，软流层表现为由局部熔融地幔物质组成厚的低速高层，而在古老地

台区, 软流层可以假设为在很大深度上由固态结晶物质所组成。

原苏联和印度合作进行的塔什干-班加罗尔 GGT, 从我国西部一直延伸至印度次大陆, 全长 3400km。横穿整个印度大陆的东向西 Kavaliudipi 断面显示, 地盾区由 17 个小块体拼合而成, 块体边界为深断层。

日本在西太平洋沟-弧-弧后系统布置了五条断面, 均从公海起, 穿过岛弧、弧后盆地至大陆, 用以研究俯冲增生过程及太平洋板块、北美板块、欧亚板块和菲律宾海板块间的边界。其中菲律宾海断面为中、日、苏三国合作, 断面在菲律宾海域沿 $N18^\circ$ 布置, 通过岛弧、中国东海和华北的 SE-NW 向断面相接。

南美洲是 GGT 工作活跃地区之一, 如 Tierray de Fuego Diego Ramirez 群岛断面, Santa Catarina 断面等。不过其地球物理资料都较少, 大都只有重磁资料。

此外, 英国、澳大利亚、南极洲等都有不少断面展出或报告。

中国在大会上展出 11 条, 占 1/5 强, 并获得一致好评。GGT 协调组多次在会议上提到中国的成就是惊人的。许多构造地质界著名学者都来观看, 都认为中国断面是出色的。专题报告会三个半天的 30 个报告中, 中国有 7 个, 占 1/4 弱。在参展的 11 条 GGT 中, 地震局编制了①东乌珠穆沁旗-丹东断面; ②满都拉-响水断面; ③阿拉善-上海断面; ④门源-宁德断面; ⑤赤峰-随县断面; ⑥遮放-宾川-江川-马龙断面等 6 条。地矿部编制了⑦灵璧-奉贤断面; ⑧亚东-格尔木断面; ⑨黑水-台湾断面; ⑩广州-巴拉望断面; ⑪东海断面等五条。各有特色和长处。在大会上作报告的断面为 1、2、3、5、7、8、9 等 7 条。主要分布在东北、华南和青藏。与各国 GGT 相比, 有以下特点:

1. 我国 GGT 数量最多, 基本覆盖全国。华北、华南、西南、青藏、南海各有数条位置适中的断面, 西北、东北也有规划和一定工作。

2. 我国 GGT 的地球物理资料最为丰富。由于普遍使用了大地电磁测深, 得到了上地幔的重要信息。它与地热流相结合, 可研究岩石圈深部构造。地震和大地电磁测深是探测地壳构造的主要方法, 用重力和磁法研究近地表地壳构造。

3. 中国最遵守国际 GGT 指南的有关规定, 而其他国家有的部分遵守, 有的全然不去理会。从 1989 年 4 月在中国召开的东亚国际 GGT 会议上, CC7 协调委员会主席 J. Monger 将亚东-格尔木和 HQ-13 线两条地学断面作为样板, 分送 CC7 协调委员会和有关国家, 以推动世界 GGT 的编图工作。28 届 IGC 上, 把亚东-格尔木地学断面与世界应力图放在国际岩石圈计划展台作为特展。亚东-格尔木和响水-满都拉断面被列为国际第一批 10 条资助出版的二条断面图。

当然, 我国 GGT 还有不足之处:

1. 高精度地球物理资料尚缺乏, 特别是多道地震反射, 并试验人工震源地震三维探测效果。

2. 综合丰富的地质、地球化学和地球物理资料尚感不够, 尤其是较深钻探, 油气田反射地震、地球化学、同位素年龄、地应力、古地磁和深源包体数据等。对各学科成果的综合研究也有不足。这些都是需要进一步研究中改进的。

1.2.2 COCORP——大陆地震反射剖面

COCORP (Consortium for Continental Reflection Profiling) 即大陆反射剖面协会, 于 1975 年在美国成立。其主要目标是, 通过测制地震反射剖面, 了解地壳的深部结构状态, 以

阐明重要地表地质构造形成的深部原因,揭示各类大地构造单元的成因机制和发展特点,最终搞清整个地壳演化规律。

在 28 届国际地质大会上,地壳和上地幔区域调查有大量报告,许多国家都广泛地开展了这项研究工作。国际岩石圈委员会主席 K. 富克斯(德国)在大会上宣读了题为“国际岩石圈计划”的报告,论述了岩石圈研究问题,分析了各国岩石圈计划的执行情况,指出了其发展途径以及科学、技术和方法的改进方向,强调了原苏联深部调查技术方法的先进性。

1.2.3 下地壳

20 世纪 50 年代前,已一致公认把莫霍面作为地壳的底面,并把地壳分为上、下两部分,上部为硅铝层,下部为硅镁层。70 年代,认为硅铝、硅镁假说是不恰当的。从 COCORP 计划开始,伴以 BIRPS、ECORS、EGT、LITHOPROBE、DEKTOP 等计划,获得有关地壳结构的大量信息,归纳有:

1. 沉积盖层以下和变质结晶基底组成的上地壳在地震反射剖面中常常是“透明的”,而在下地壳内部则取得了许多反射层,其中部分层状显示很清晰。

2. 这种反射层有多种性质,相当层面或层理面,代表一个构造面(如滑脱面、逆掩断层面等),它是层状贯入的基性岩床,与岩石静压力下岩石裂隙中孔隙水压力有关的波速和密度有关。

3. 从地壳中层开始(12—15km),岩石是韧性的,往下还出现塑性流变。

4. 低角度逆冲断层在地壳内,包括大陆克拉通和造山带广泛发育,有时还有多层次叠片重复,如加拿大西海岸;

5. 造山期后,拉张作用占优势,或者说拉张作用是造山期后存在的一个阶段,拉张构造不限于地壳上层,可以扩展到中、下地壳。

6. 从地壳表层直到莫霍面,整个地壳是一个连续的、完整的岩石谱系,成分上并无重大突变带,所谓康腊面并非连续面(Smithson, 1977)。

下地壳的研究是国际岩石圈计划的关键项目之一,它需要跨学科(地质学、地球物理学、地球化学和大地测量学等)研究和国际合作,研究方法也是综合的;综合地震法(反射、折射、P 波/S 波)、地震震源、捕虏体分析、包体分析、应力分析等。壳内岩浆岩地震显示为“亮点”,高角度反射的下地壳是层状结构,划分了脆性、韧性层,下地壳模式根据几个学科和分支学科已进行了补充,建立了麻粒岩数据库,目的是限定下地壳成分。根据所收集的麻粒岩相地体的岩石分析资料,并与来自下地壳捕虏体的同类资料对比,表明前者较后者更偏长英质。在这方面已收集了 1700 多个样品的分析数据。

此外,英国 BIRPS 在苏格兰北部已确定上地幔的反射现象,其地幔反射的双程传播时间约为 30 秒。英国剑桥布拉德实验室 S. 克莱姆佩列尔等人在 5000m 深的北海裂谷系进行深地震测深,在礁下的上地幔中发现了可能与断裂带相对应的倾斜反射。匈牙利对上地幔反射系统的研究也很成功。

虽然上万公里反射剖面已得出了地壳的图像,但还不知道这些结晶地壳反射图像的性质,其本质尚待探索。

1.2.4 科学钻探

在美国,广泛使用“科学钻探”这一概念。它包括任何深度的为科学目的而打的一切钻孔。科学钻探分海洋和大陆科学钻探两方面。而同时开展这两方面科学钻探的目前只有

美国。每年总经费达 5000 万美元，其中大部分用于海洋科学钻探上。

1.2.4.1 大陆科学钻探

美国“大陆科学钻探计划”始于 1972 年。1972 年 11 月 27 日至 1974 年 4 月 13 日完成了美国俄克拉何马州的伯莎、罗杰斯的钻井任务，井深 9583m，是目前已知美国最深的超深井。它主要是评价该区深部油气远景的。1983 年 12 月，白宫科学技术政策办公室把大陆超深钻计划列入 1985 年度应增加拨款的前沿课题，使大陆科学钻探计划出现生机。1984 年 3 月，成立了以 B. 雷利为主席，有 39 所大学 100 多位科学家参加的“大陆地壳深部观测及采样团体”（DOSECC）负责大陆科学钻探计划的协调、组织管理和成果出版等工作。经费主要由美国国家基金委员会拨给。1985 年，DOSECC 提交了在美国开展大陆深部钻探的计划，井位 29 处，遍布美国各地。按钻井深度和目的分为两大类：第一类是井深在 5km 内，目的是了解大陆地壳内部正在进行的各种地质作用，主要包括地震机制、热液系统和活动性岩浆房等，目前正在实施的“上地壳项目”、“卡洪山口项目”和“卡特迈项目”等；第二类是预计最大井深超过 12km 以上，目的不仅限于研究地壳内的动态过程，而且还要探索地壳的历史、结构、物质成分和深部环境等。1988 年在斯坦福大学组织了“大陆科学钻在现代地学中的作用，90 年代的科学合理性和计划”讨论会。该年制定了联邦法规“大陆科学钻探和研究条例”，由能源部、国家科学基金会和地质调查所建立了部门间协调小组并制定了“美国大陆科学钻探计划”。由美国最高立法和行政当局批准有关大陆科学钻探的联邦法规是不寻常的，表明高层机构认识到了解地壳中的作用过程和构造对国家的繁荣昌盛是非常重要的。首次承认必须制定长期合理的大陆科学钻探计划，建立相应机构，以便该计划有效实施。联邦法规加强了 1984 年成立的部门协调小组的权力。该协调小组每年应向国会报告有关大陆科学钻探的日常活动、近期计划和未来调查。联邦法规确定的基本目的是：①增加对大陆成分、结构、动力和演化、地震、火山喷发、地热能传递、矿藏分布和矿物燃料产地及地下水的性质和空间分布等方面的基本了解；②获得对埋藏有害废物来说是至关重要的地壳资料；③发展工艺技术。

美国计划实施的超深井有：

(1) 阿巴拉契亚井，位于阿巴拉契亚山脉南段，佐治亚州与南卡罗来纳州交界。设计井深 10km，已完成井区地质、地球物理、井位确定、浅部钻进取心等前期工作。钻井的目的是检验 COCORP 项目在南阿巴拉契亚地区发现的入字型薄皮逆冲推覆构造，同时还要揭示被逆掩的沉积岩系产油气的可能性。它将打穿“外来”变质岩系，进入下伏古生代沉积岩系，至“原地”前寒武纪变质岩系。

(2) 得克萨斯湾井，位于得克萨斯州德威特县境，设计井深 10—12km，钻井将穿过沉积岩层，进入基底变质岩系，了解墨西哥海湾及海岸沉积盆地的沉积作用和含油气性，以及基底性质。

(3) 夏威夷岛井，设计井深 12km，计划对该岛下面整个大洋地壳进行岩心取样，研究夏威夷式火山的地球化学演化和火山构造演化，大洋地壳结构成分和演化。该井达 12km 就可进入上地幔，可研究莫霍面的岩石学和地震学等特征。

(4) 计划超过 7km 的超深井还有伊利诺斯盆地井（设计井深 9km）、峪岭区井（设计井深 7km）、弗兰西斯科井（设计井深 8—10km）、沃萨奇断层井（设计井深 10—11km）。

通过科学钻探，人类首次可以达到过去无法接近的地区，在这里可能正在发生迄今尚

不了解的深部化学和物理作用过程，有可能发现稀有同位素工业矿床，甚至发现地表不存在的超铀元素矿床。不仅传统类型的能源和矿物原料可望增加，而且由于对地球深部各种作用和构造的了解达到了新的水平，因此可望开发利用全新的能源和矿产资源。在不久的将来，工业部门可大规模开发地球深部高压和干热岩热能。在生物学方面，利用科学钻探可解决地壳中生物圈的下限问题，可以研究地下各种罕见的生命形态在地上动、植物演化过程中所起的作用，包括对人类疾病的可能影响。

近年来，美国对在极端温压条件下存在的地下生命形态作过广泛研究，制定了地下深部微生物研究计划，每年能源部为此大致拨款 2—3 百万美元，要求在爱达荷州和华盛顿州打专门的微生物钻孔。归纳起来，美国科学钻探特别注重解决下列研究方向的重大问题：

1. 地震

通过实验和理论研究来阐明地震机制，评价灾害和减少危险的可能性，在许多情况下是受限制的。其原因是地质现象出现的空间规模大，时间延续长，深部物理化学条件又不确定。研究弹性应变（地震）能突然释放问题的最适宜对象要算加利福尼亚州的圣安德烈斯断裂。太平洋板块和北美板块沿着这条断层发生缓慢的相互滑动，并伴随周期性地发生大地震，最近一次灾难性地震是在 1989 年。为了了解沿圣安德烈斯断层板块运动和地震发生所需要的地壳应力状况，驱动和阻碍板块运动力的性质，沿板块边界地壳变形性质以及地震集结和传播的物理性质，在离断层 4km 的卡洪山口打钻验证，计划井深 5km，已打 3510m，井底温度 142℃。对该钻孔的各种各样的科学研究，对原地应力、断裂作用、地壳的物理特征、孔隙流体循环和热运移之间的关系有了新的重要的认识。关键数据包括应力大小和方向，热流随深度的变化，钻孔中主要构造不连续面的地球化学、同位素、岩石物理和地震证据。其中最重要的科学成果是，在所达深度应力测量结果为：平行圣安德烈斯断层面上无右旋剪切应力，在钻孔中只能记录到与断层垂直的常见应力；在浅部记录到拉伸应力，接近井底位置变为强烈挤压。同时，没有证据证明有足够大的原地渗透性可通过对流而产生大量的热运移。

过去的 20 年，为了论证圣安德烈斯断层的应力状态，进行了各种各样的实验和理论探索，并据此推断在相互推挤的两个岩块之间形成了一条强烈的断层，并在通过滑移（地震）释放出部分应力之前积累了巨大应力，因摩擦而产生热量。但在圣安德烈斯断层的地面附近并未发现过量的热，应力值也很低，说明断层活动是微弱的。上述所测结果，证实了微弱活动断层的假设，从而解决了关于该断层是微弱还是强烈活动这一争论长达 10 余年之久的问題。并由此将卡洪山口钻孔变为常设的地震地质实验基地。

2. 火山活动、岩浆作用和热液活动

火山活动与地震一样，也会造成危害。这就提出评价灾害和减小损失的问题。在研究火山活动时面临确定岩浆源位置和成矿岩浆热液系形成的任务。为此，选择了加利福尼亚州长谷地区、新墨西哥州瓦列斯破火山口（即“巴耶斯破火山口”，原文 Valles，此似应按西班牙语发音译为“巴耶斯”，下同）、阿拉斯加州卡特迈火山及科罗拉多州克里德破火山口打科学钻。

卡谷破火山口是在 70 万年前出现的。热源地处约 7km 深度上的部分熔融岩浆房。浅钻结果表明，较粘的流纹岩岩浆是通过玄武岩包围的通道运动的。气体是从岩浆中析离出来的，这种脱气效应是引起美国西部火山爆发活动的起动力作用气体的重要来源。1989 年 8

月开始在这里打科学钻, 预计深度约 6100m, 或达 500℃ 的温度。

瓦列斯破火山口非常典型, 规模也大, 直径约 22km, 形成时间在 112 万年前。已打了三口井。在一个钻孔 2.5—150m 井段内见到钼矿化 (Mo 含量达 0.6%), 矿物共生组合是在温度为 200—225℃ 的流体系统所特有的。连续取心终孔深度为 1262m。计划在复活穹隆中心打一个 5.5km 深的钻孔。

卡特迈地区在 1912 年发生火山喷发, 伴随有人类历史上最大的流纹岩喷出。通道位于沉积岩中, 尚未破坏。因此, 非常有利于阐明岩浆活动力学、化学和热后果以及建立流纹岩爆发、侵入体冷却和金属搬运的模型。已提议对埋藏不深的岩浆源的热能资源进行评价。从 1991 年起, 计划打一系列深不超过 1km 的钻孔, 有的钻孔位于中心喷发体内, 穿过通道岩石, 有的则靠近火山口以及离火山口有一段距离, 穿过 200m 厚的流纹岩岩被。

1990 年开始在克里德地区打钻, 目的是研究多幕形成的破火山口酸性杂岩体以及相应的热液矿化作用。矿体是在 2500 万年前形成的, 也就是在大型圣胡安破火山口中火山活动终止后相隔 100—300 万年形成的。计划要获得浅成热液矿床成因方面及其可能叠加到深部斑岩矿化之上的有关信息。为了对热液系统中能量和物质运移进行定性模拟, 也必须获得类似的信息。可分二个阶段钻进: 开始打深度不到 1km 的井, 然后打深 3—5km 的井, 穿过整个火山岩剖面, 进入花岗岩深成岩体同源岩浆层的顶部。

3. 热状态和地热能

在美国, 有一些人认为: 地热能可以而且应当在满足美国能量需求方面起更大的作用。然而, 有效地利用地热资源的许多问题目前尚未充分阐明。研究工作正朝着开发利用地热流体系统和干热岩热能两个方向发展。

为了开发利用地热流体 (或称热水) 系统的热能, 必须取得有关热对流机制, 岩浆源附近超临界溶液、该系统的地质控制因素、岩石与流体间的化学作用、流体成因等方面的经验性资料。最迫切的问题是要研究岩浆源的埋藏深度、规模及其表面起伏情况。

加利福尼亚州的索尔顿湖地堑是美国重要的地热流体系统之一。科学钻进已经结束。该地堑处在从东太平洋隆起扩散带向圣安德烈斯转换断层过渡位置上。地热田可获电力估计为 5800MW, 运行期间达 30 年。安装的第一台半工业 16MW 功率的动力装置已于 1982 年运转, 随后建造了 49MW 功率的电站。预计还要建立几个功率更大一些的电站。由于地下卤水含 28% 的可溶性固体物质, 在这方面的快速商业开发受到限制。不过, 这种缺陷将会变为一种优点, 因为该卤水区有可能变成极大的铂矿床, 并可提供美国锰和一些战略金属需求类的 30%。

索尔顿湖科学钻探 3220m, 井底深度 355℃。在过饱和盐水与正常盐水之间的带内有矿石矿物沉淀。

指示矿物角闪石表明, 岩石的形成温度比早先根据野外和实验资料推断的温度要低。对最重要的变质岩相之一的温压范围所作的这种修正已被应用到区域地质工作中去。

美国大陆科学钻是从 1970 年由能源部洛斯阿拉莫斯国家试验室开始实施的。当时是根据含有水压致裂垂直裂隙的水力循环系统制定的开采渗透性差的“干热岩”能源计划。为了开采这种热能, 必须往热岩中注水。钻井位于洛斯阿拉莫斯市西约 30km 的芬顿山上, 由酸性火山岩组成的瓦列斯破火山口内, 在 1977 年 10 月建成了世界上第一个由两口深约 3km 的井组成水力循环系统。这是一种借助岩石水力压裂方法建成的人工热储, 井底温度

200℃, 热流功率达 5MW, 部分热用于发电。在第二阶段, 要建成一个以两口深约 4.5km 斜孔为基础的水力循环系统, 井底深度约 320℃。预计在芬顿山可用几个循环系统建成一个功率 75MW 的地热电站。

4. 岩石圈的演化和动力学

在目前条件下, 只有超深科学钻才能为陆壳和洋壳演化及结构的某些概念, 首先是板块构造理论提供实际材料。在这方面, 美国计划在阿巴拉契亚、伊利诺斯和夏威夷打三口超深井。阿巴拉契亚超深井在佐治亚、北卡罗来纳和田纳西州交界处, 井深超过 10km, 用作深部探测。推测非洲板块和北美板块大约在 2.7 亿年前在这里碰撞, 可能形成规模最大的元古宙结晶岩石推覆在早古生代沉积岩上的逆掩断层, 水平断距超过 250km, 其底板可以追索到 7—8km 深处。计划使这口井能变为对造山带长期进行地质-地球物理研究的国际性实验室。

伊利诺斯科学钻位于伊利诺斯盆地中央凹地之下裂谷构造的结合部通过打钻解决 15 亿年的老流纹岩-花岗岩杂岩体从 38°纬线向南的延伸范围。该井原计划要穿过 5km 的古生代沉积岩, 进入结晶基底的深度不小于 3km。

拟议中的夏威夷科学钻穿入地幔的计划具有特殊意义, 其目的是研究莫霍面的岩性特征和地质特点, 岩石圈挠曲范围内地幔顶板的构造和均一性, “热点”性质, 夏威夷火山机构的构造演化, 更新世期间地磁场倒转的历史。分两个阶段钻进, 先打 5—6km 深度, 然后打 9km 深处。

5. 沉积盆地的演化和油气资源

有关沉积盆地形成的许多问题尚未得到答案: 地层水是怎样形成的; 它是怎样运移, 为什么会运移; 油气是怎样形成的, 是什么因素决定并控制石油的运移; 油储非均一性的影响范围有多大及其成因特点如何, 等等。为了回答这些问题, 美国决定在墨西哥湾得克萨斯沿岸(德威特县)打一口科学井, 井深计划 11—12km。钻井过程中研究的问题有: 深埋沉积盖层的高温承压水长期循环机制; 动力成因生油盆地中地层流体和油气的地球化学性。总之, 最终要阐明大型被动陆缘盆地的形成历史, 它被沉积物充填以及使变质改造的岩层“焊接”到破坏陆缘上的历史。

6. 对地壳的地球物理研究资料的验证

应用新的极其复杂的地球物理技术查明陆壳上部极为多种多样的构造和相互间的几何学关系。利用延伸很长的地震剖面反射波多道记录以及电磁测深方法可取得重要成果。但是, 在大多数情况下, 对地震波反射面的原始性质或结晶岩系中高导电率带的原始性质并不清楚。在缺乏科学钻获得经验资料的情况下, 单用地球物理方法识别深部构造是不可能的。

7. 放射性和核废物的埋藏

随着现代工业的发展, 确保上百至上千年期间埋藏放射性废物不出现危险, 这是美国地质人员面临的另一项任务。在这一方面, 科学钻是确定埋藏有害废物的国家长期战略的前提条件。在完成这项任务时, 必须考虑到地震和火山活动的潜在危险性, 穿过地壳的流体成因及运动特点, 流体与岩石间热和物质的交换以及一系列其它自然作用过程。

美国大陆科学钻进计划负责协调联邦政府三个主要部门即能源部、国家科学基金会和民政部地质调查所的活动。1984 年, 这些部门签订了部门间协议, 建立了部门间大陆科学