

中国地质科学院 编



YANSHIQUAN

岩石圈研究基本问题和方法

冶金工业出版社

46.208

岩石圈研究基本问题和方法

中国地质科学院 编

冶金工业出版社

16.208

内 容 简 介

本书包括36篇论文。书中着重从地球物理学、地球化学、板块构造学说与实验地质学等方面综合介绍了近年来岩石圈研究的一些基本问题和新进展,并简明扼要地论述了地壳-上地幔地球物理学和地球化学的基本概念及其依据的现象和事实。

书中以大量实例介绍了有关方法在岩石圈研究中的应用。总结和评价了国内外岩石圈研究现状和取得的主要成果,特别是近垂直地震反射剖面技术在地壳细结构研究中的成就。从寻找矿产资源和防止地质灾害等方面,论述了对岩石圈研究的深刻意义与发展前景。

本书可供从事地球与空间科学研究的科研人员、教师、野外地质工作者使用,也可供研究生和大学高年级学生参考。

岩石圈研究基本问题和方法

中国地质科学院 编

冶金工业出版社出版发行

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所经销

冶金工业出版社印刷厂印刷

787×1092 1/16 印张 23 1/2 插页 1 字数 564 千字

1990年5月第一版 1990年5月第一次印刷

印数00,001~700册

ISBN 7-5024-0634-4

P·7 定价13.90元

编者说明

自从80年代地球科学前沿的“岩石圈动力学和演化：地球资源与减轻灾害的纲要”提出以后，该领域的基本理论、技术方法及其应用发展很快，并取得了较大进展。为了使广大地质工作者了解这些新成就，进一步推动我国岩石圈的研究，我们于1985~1986年先后举办了三期“深部地质讲座及学术讨论”班。聘请了国内外知名教授、专家和学者30余人，较全面地讲授和介绍了岩石圈研究的基本问题、方法和应用。1986年在各位专家讲稿的基础上，汇编了《岩石圈论文集：深部地质-地球物理方法与成就》一书，该书受到学习班学员和国内地学界的欢迎。

为了满足广大地质工作者，特别是基层单位的要求，决定于1987年在“岩石圈论文集”基础上，正式编辑出版本书。在编辑过程中除请作者对原文进一步修改和补充外，又收进原来因时间关系未能编进的一些专家的讲稿。并对有关内容进行了调整。

本书的作者绝大部分是我国该领域中著名的专家、学者，因而书中内容基本上反映了当前该领域的科研水平和取得的成就。本书资料丰富，文图并茂，其内容涉及了地球科学研究的各个领域，它的正式出版将会对我国地球科学的发展产生重要的影响。

本书的出版得到了地质矿产部教育司的大力支持，中国岩石圈计划全国委员会主席程浴淇和马古垣教授以及原中国地质科学院院长李廷栋研究员等也对本书的出版十分关心，地矿部副部长、中国地球物理学会副理事长夏国治为本书题写了书名。

本书整个编辑过程得到了吴功建教授的指导和帮助。业务编审由王毅、高锐负责。前20余篇由王毅负责，其余部分由高锐负责。付子杰和高海燕协助清绘了部分图件。

由于时间仓促及水平有限，书中错误难免，敬希广大读者批评指正。

中国地质科学院 岩石圈研究中心
人事教育处

1988.10

目 录

1	深部地质——一个具有广阔应用前景的前沿学科·····	李廷栋 (1)
2	对深部地质工作的几点体会·····	张炳熹 (3)
3	国际岩石圈计划和我国的岩石圈动力学编图·····	马杏垣 宿 俭 (5)
4	在深部地质探索中的实验研究·····	李兆鼎 尚如相 (11)
5	近年来国外岩石圈深部地质研究的进展和展望·····	肖庆辉 (20)
6	变质作用类型和深部地质作用的讨论·····	董申保 (29)
7	岩石圈构造演化的基本特征·····	任纪舜 刘凤仁 (37)
8	亚洲大陆构造地质研究的某些动向和倾向·····	李廷栋 (48)
9	关于地球壳幔结构及演化·····	莫宣学 (55)
10	板块构造说的新进展以及中国板块构造的研究·····	王 荃 (67)
11	大陆山链的岩石圈变形·····	许志琴 崔军文 (77)
12	汾渭地堑与贝加尔裂谷系的比较构造分析·····	崔盛芹 李锦蓉 (87)
13	中国东部大地构造研究值得注意的几个问题·····	刘雪亚 (95)
14	上地幔组成及熔融玄武岩浆的作用·····	路凤香 (104)
15	天文地质在深部构造研究中的意义·····	张勤文 (113)
16	早白垩世以来我国东南沿海及邻区的地质、地球物理特征及构造演化 ·····	黄怀曾 洪大卫 (124)
17	上扬子地区深部地质-地球物理工作的进展·····	郭正吾 康义昌 (140)
18	地质力学工作的新进展及其在深部构造研究中的意义·····	邓乃恭 (150)
19	COCORP在美国地壳细结构研究中的成就简介·····	吴正文 (157)
20	蛇绿岩套中变质橄榄岩的流动构造及其成因、分类和研究意义·····	崔军文 (170)
21	岩石圈·····	曾融生 (182)
22	卫星高度重磁资料的分析和应用·····	刘心铸 (198)
23	利用重磁资料研究地壳和上地幔构造的方法和问题·····	朱 英 (212)
24	地壳及上地幔的地球物理·····	顾功叙 (221)
25	古地磁与大陆漂移·····	周姚秀 (232)
26	大地电磁测深法在岩石圈研究中的应用及中国大陆地壳上地幔电性 结构的基本特征·····	刘国栋 (243)
27	现今地球动力学的某些进展及其与地震的关系·····	马宗晋 陈 强 (258)
28	天然地震方法在岩石圈研究中的应用·····	冯 锐 (266)
29	地球物理CT技术及其应用·····	冯 锐 (278)
30	岩石圈研究中的地热学方法及应用·····	沈显杰 (286)
31	下扬子地区第一条深达近岩石圈底部的地球物理-地质综合大剖面 (IIQ-13线)·····	陈沪生 (302)
32	我国大陆岩石圈的地震学研究·····	朱介寿 (318)

33	岩石圈中现今地应力场的研究 and 应用	孙 叶(328)
34	国外岩石圈研究的现状和主要工作方法	张肇元(338)
35	岩石圈地球物理方法在中国取得的某些成果以及今后设想	吴功建 高 锐(352)
36	对深部地质的认识与进一步开展我国地质工作的几点意见	程裕琪(367)

1. 深部地质——一个具有广阔应用前景的前沿学科

李廷栋
(地质矿产部)

随着人类社会的发展和科学技术的进步,近几十年来,特别是60年代以来,作为实践和理论密切结合的地球科学获得了迅猛的发展,产生了一系列新的理论和新的技术方法,派生出许多新的边缘学科。地球科学赖以快速发展的基础和这种发展的主要标志,是地质学、地球物理学、地球化学、数学以至于生物学等的相互渗透与结合。这种渗透与结合,不但使一些传统的地质学科,如矿物学、岩石学、构造学、矿床学等得到了长足的进展和革新,而且给人们提供了崭新的科学思维的条件和基础,扩大了人们的视野,发展了一些新的研究方向和研究领域,在很大程度上增强了人们分析探索客观地质规律和辨别其真伪的能力。深部地质或称岩石圈地质的研究,就是在这种背景下产生和发展起来的一个新的研究方向。

同其他许多学科一样,深部地质也是人们在生产实践和科学实验过程中,为了满足人类生产、生活和科学探索的需要而产生的,是地质学、地球物理学、地球化学、大地测量学等相结合的产物,是人类在认识我们这个星球长途不断向“自由王国”迈进的一个重要的里程碑。实践业已证明,深部地质地球物理的调查研究,不但在揭示地球深部的结构和构造、地壳上地幔的形成和演化、陆块的聚结和离散、以及造山带形成机制等方面,具有重要的理论意义;而且在指导矿产资源勘查、探索地震活动规律、防治地质灾害等方面,具有深远的实用意义。目前正在执行的国际固体地球科学研究计划——岩石圈研究计划,充分反映了科学家们欲达到这种双重目的的一种努力。这个计划的宗旨,除了获得纯科学的成果以外,还要为满足人类未来福利的需要作出贡献,“提供更合理评价各种资源限度的背景信息”,“更好地制定出环境保护和维持开发与环境保护之间平衡的计划”,为矿产资源勘查和评价、预测及减轻地质灾害提供科学论据。

经验在积累,科学在进步。经验和科学使人们越来越深刻地意识到,地球科学发展到今天,人类为了满足自身对矿产资源日益增长的需求,预防和最大限度地减轻地质灾害,需要从新的角度来看待深部因素在地壳、上地幔的形成、演化和矿产形成、分布规律等方面所起的重要作用。研究深部地质正是人们得以提高这种认识的一个重要手段和途径。这或许就是世界各国和国际地学界高度重视深部地质地球物理调查研究的主要原因。

30多年来,我国地质工作取得了举世瞩目的成就,地质科学技术获得空前的发展。但是,我们不能不看到,地质工作在向前迈进的过程中面临着来自各方面的挑战,国家的四化建设和社会发展对地质工作的要求越来越高,而找矿的难度越来越大,投资越来越高,各种天然的和人为的地质灾害有增无减。我们应付这种挑战的主要办法,就是要依靠科学技术的进步,提高对各种地质现象、地质规律的认识能力。加强深部地质地球物理调查研究,就是推动地质科学技术进步,提高对地质现象认识能力的一个重要方面。近年来,世

界各国和有关国际学术组织在深部地质方面开展了大量的调查研究,实施了几个地质、地球物理相结合的国际性研究计划,取得许多带有突破性的科学成果,大大开阔了人们分析、认识地质规律的思路,带动了一系列新技术的发展,不但为探讨全球构造的若干理论问题作出巨大贡献,而且对于提高找矿效果和矿产预测能力,探索地质灾害成因和评价环境质量等方面,都发挥了积极的作用。

我国深部地质地球物理调查研究工作起步并不算晚,也取得了不小的进展和成就。但由于众所周知的原因,这项工作的进展比较缓慢,同国际相比尚有不小的差距。作为地球科学一个十分有发展前途和应用前景的前沿学科,现在需要采取有效措施,逐步加强这项工作,否则,我们的地质工作将会处于十分被动的地位,将会缺乏后劲,将会在很大程度上影响我们对我国大陆及毗邻海域地质构造和地质规律的认识水平,从而影响我们对矿产资源探寻和预测能力,阻碍地质工作在新的基础上向更高的水平发展。

为了有计划、有步骤地开展我国岩石圈的研究,在一个较高的起点上用不太长的时间赶上国际先进水平,需要依据我国实际情况,借鉴国外先进经验,制订全国的长远规划和近期计划。在全国统一规划下,各有关部门分工协作,相互配合,从生产实践所面临的关键地质问题着眼,用先进的理论作指导,共同完成深部地质、地球物理调查研究任务;同时,也需要大力普及有关岩石圈的科学研究和技术方法,大幅度地提高队伍的科学技术水平和从业人员的科技素质。正是基于这种考虑,我们从1985年开始有计划地举办了三期深部地质讲座和学术讨论班,聘请了各部门的专家、教授讲课,同来自生产、科研、教学等单位的专家们一起,沟通信息,交流经验,相互学习,教学相长,学习到有关岩石圈研究的一些理论和技术方法,进一步了解到国际岩石圈研究现状和发展趋势,对我国及毗邻海域岩石圈结构和某些重要的构造问题获得一些进一步的认识,开阔了分析研究地质构造问题的思路。

三期讲座和学术讨论班的内容是丰富的,收效是明显的,反映是良好的,这使我们得到很大的欣慰和鼓舞。因为能为同行们办成一件实事和好事,使大家有所收获和启示,这是我们最大的愿望和快乐,更是我们对我国地质事业应尽的义务。之所以取得较大收获和较好的效果,除了全体学员的刻苦努力,勤奋苦学以外,来源于各位授课专家、教授的高度责任心,精心备课,精心讲授;来源于中国地质科学院岩石圈中心、中国地质科学院人事处、中国地质学会秘书处的出色的组织工作和全体工作人员的艰辛工作;也来源于中国地质科学院天津地质矿产研究所、地质力学研究所和地矿部青岛海洋地质研究所的具体组织、协助和优良的服务。对这些单位和同志们为这次深部地质系统讲座和学术讨论班所付出的劳动和贡献,一并表示衷心的感谢。

现应各单位和广大地质、地球物理工作者的要求,把三次讲座的讲稿重新整理和补充、修改,汇集成册,予以出版,提供给更多的同行借鉴、参考,期望它能对大家的工作有所帮助,对我国地质事业的发展有所帮助。限于我们的水平,其中的缺点和问题在所难免,切望获得广大读者的批评指正,以改进我们的工作。

2. 对深部地质工作的几点体会

张炳熹

(地质矿产部科技顾问委员会)

一、深部地质处于不断发展和综合研究阶段

目前,国内外对深部地质的研究,仍处于不断发展,不断深入的阶段。关于对深部地质问题的探讨,也不像从前那种只凭少量事实或忆想进行推测解释,而是凭更多的科学依据以及严密的科学方法,使其认识更接近于事实。比如对软流圈的研究,最初人们作地面重力测量时,发现高山并未引起垂直偏移,说明山体密度低,可能与周围地壳处于重力均衡状态有关,故推测地壳之下,可能存在一个能使地壳密度的不同部分在高度上得到不断调整,以达到重力均衡状态的软流圈。当时这仅是一种设想,后来据海洋地球物理、海洋钻探资料,联系大陆边缘的地质构造特点以及有关地震测量等方面的地球物理数据,充分说明了在岩石圈之下,有软流圈的存在。

本世纪初,据天然地震波的分析,将地球内部分为地核、地幔、上、下地壳等几个圈层构造,发现在不同圈层之间存在明显的反射界面。例如莫霍地震反射面,过去一直认为是一连续的地壳与地幔的分界面。利用天然地震波发现的康氏界面,曾认为是硅镁层和硅铝层之间的界面。后来随着科技进步及技术方法的改进,如应用人工爆破和可控震源的垂直入射等新方法后,认为莫霍面并不是单一的清楚的地震反射面,有的地方为波速不同的夹层,其延续深度可达10~20km,认为康氏面也很不明显,甚至否认康氏面的存在。在苏联科拉半岛的超深钻中,并没有在地球物理方法测定的深度上遇到物质成分发生变化的界面。此外,还发现了许多新的情况:(1)发现了地壳内部存在若干分层,它们不仅在垂向上不均一,而且在水平方向上也不均一,这可能反映了深部物质向异性特点,反映了地震波的传播速度与物质密度、成分及存在的状态有关;(2)发现了很多上陡下缓的铲式断层,说明地壳内部存在着横向推覆或滑脱构造,并与地面陡倾斜的断层相连。

上述情况表明,仅用一种方法探测深度是不够的,必须要多学科配合。为解决深部结构和确定各结构单元的物质组成问题,仅就地球物理方法而论,至少需要地震与重力方法相结合,因它们各有不足之处,地震方法仅能得出地震波速的分布及分层情况,但不能反映是什么物质。而应用重力方法,可测出重力异常,据重力异常与地震资料反演,计算,可确定地壳密度分布。如要确定地壳是由什么岩石组成,还需要其他方面的资料。实际上,我们对深部的研究所涉及的地质问题是很多的,不仅需要地球物理方面的数据,还需要岩石学、地球化学、高温高压实验、超深钻等方面的资料,去推断深部的物质组成。

总之,对深部地质的研究,需要各个学科互相配合,进行综合研究,得出较为接近的共同认识。值得注意的是,目前各个学科仍处于不断发展阶段,许多结论尚未达到定论的程度。

二、关于岩石圈的研究

80年代国际岩石圈研究计划,涉及到许多地质的理论及概念问题,这些问题实际上在

以往都存在。只是当今又挑选出若干方面的重要问题,通过国际合作,使认识更深入一步,以达到防治自然灾害,寻找矿产资源的目。该计划中之所以要重点研究大陆岩石圈,因近20年来板块构造学说发展,并将用板块构造运动观点解释地壳的发展史。根据海洋地球物理资料,新的钻探资料以及现代地壳活动的地震带、火山带、岛弧及海沟等现象,用板块理论能较好地解释现代大洋地壳的形成和中生代以来大陆的分裂和漂移。可是,应用简单的板块运动机制来解释大陆地壳的全部发展史也是困难的,这一直是个有争议的问题。苏联地质学家别洛乌索夫认为现代洋壳年龄轻,是从中生代以后发展起来的,而大陆壳的发展演化有几十亿年的历史。此外,他对全部使用水平运动来解释海底扩张、板块俯冲等地质问题表示怀疑。

岩石圈计划主要强调研究大陆岩石圈,也就是想在大陆上,再进一步检验一下板块学说究竟能应用到什么程度。现在人们倾向是从元古代起可以应用,元古代以前能否适用还有疑问。这涉及到目前对原始地壳的生成以及由太古宙经元古宙、显生宙的陆壳演化过程了解甚少。目前国际地质对比计划(IGCP)内,前寒武纪地质也是一个重要的研究课题。至少现在人们认为陆壳比洋壳复杂,洋壳较薄,而陆壳厚得多,陆壳历史长,许多事件尚需进一步了解和解释。

岩石圈计划中,还提出解决有关理论和实验问题,特别是关于动力学问题。比如对软流圈物质及状态的研究,自30年代起,就有人注意到有些玄武岩的深源包体中的纯橄榄岩,其橄榄石晶体具有一定的排列方向,这表明它是在一定的动力条件下结晶的,这现象说明深部存在韧性剪切作用。在动力变质地区也存在韧性剪切作用。这反映片理、片麻理生成时,其构造变形、结晶作用和动力之间有密切关系。

在岩石圈计划中,特别提到了大陆盆地形成机制。关于盆地的形成机制一般与运动形式有关。与什么样的运动有关,却认识不一致。有人认为与垂直运动有关,因许多大型盆地在一定时期内,接受巨厚的沉积,其盆地的基底也相应下沉,如用水平运动较难解释基底的下沉。有人认为盆地都是处于重力均衡状态的,开始时由于地幔上拱,地壳减薄,以后由于地幔活动减弱或停止,引起地壳连续下沉而形成盆地,他们把地壳的升降与深部热机制联系在一起。

在岩石圈计划中,提到岩石圈成因和演化,重点提出中、新生代大洋地壳的动力学,中新生代山脉及中生代前的构造研究。研究深部物理作用与流动、温度及速度的关系。

目前已明确,实施国际岩石圈计划不受时间限制,并准备安排全球200条剖面,这些剖面为通过大陆中心及海洋,以探测深部情况的大剖面。对岩石圈研究时,强调对大陆边缘的研究,因为它是板块边界,又与地震、能源(石油)有密切的关系。

在实施岩石圈计划过程中,各国研究程度很不相同,苏联除作大面积深部地球物理工作外,在科拉半岛打超深钻以进行检验。西欧各国联合起来,在北海至非洲北岸作地震渊深剖面并制定打深钻计划,西德已选好深钻孔位。在中国也制定规划,加强对深部地质的研究,我认为应在国家财力、物力条件允许下,选择一种最优方案,充分利用各个方面的资料(地球物理、地球化学、深钻、岩石学、地表地质等等)对深部地质进行不断深入的研究。

3. 国际岩石圈计划和我国的岩石圈动力学编图

马杏垣 宿 俭

(国家地震局地质研究所)

一、80年代国际“岩石圈动力学和演化”计划的建立和发展

被称为80年代地球科学前沿的一个国际性多学科研究计划：“岩石圈动力学和演化：地球资源和减轻灾害的纲要”。它是根据国际大地测量、地球物理联合会 (IUGG) 和国际地质科学联合会 (IUGS) 联合倡议，由国际科学联合会理事会 (ICSU) 建立起来的。这是60年代上地幔计划和70年代地球动力学计划的科学成就和国际多学科合作精神的继续。

这个计划的酝酿和设计是从1977年开始的。当时国际大地测量、地球物理联合会 (IUGG) 及国际地质科学联合会 (IUGS) 执行委员会原则同意应该考虑一个精心设计的国际性多学科固体地球科学研究规划，接替预计在1979年底结束的国际地球动力学计划，在80年代执行。两联合会指定了一个任务组 (Task group)，负责研究准备规划方案。任务组经过一年多的努力于1979年2月提交给两个联合会的执行委员会一份报告，题为“岩石圈——80年代地球科学研究的前沿”。对新的固体地球科学国际性规划的主导思想和目标进行了较全面的阐述。两联合会接受了这份报告作为80年代国际地球科学规划的基础，并共同指派了一个由20位科学家组成的“指导委员会” (Steering committee) 接替任务组在1980年5月前准备好向国际科联理事会 (ICSU) 提交正式规划方案及建立新的规划管理机构的具体事宜。

岩石圈规划指导委员会于1980年4月写出“岩石圈动力学和演化：自然资源和减轻灾害纲要”提交给国际科联理事会 (ICSU) 的科学重点委员会 (Sub-Committee on Scientific priorities) 并得到了赞助。指导委员会于1980年7月3~5日在巴黎开会讨论了以下五个问题：(1) 跨联合会岩石圈委员会 (Inter-Union Commission on the Lithosphere, 简称ICL) 的章程；(2) 提名新委员会的执行局成员；(3) 对规划开始要建立的工作组 (Working group) 提出建议；(4) 对成立协调委员会 (Coordinating Committee) 的建议；(5) 经费预算。

国际岩石圈计划的中心任务是阐明岩石圈 (即地球的石质外壳) 的性质，动力学、成因和演化。目前，虽然大洋岩石圈的研究还很不够，但随着地球科学的发展，把注意力又集中于大陆及其边缘。这是因为大陆成分不同，平均比重较低，它漂浮在地幔上，渡过了地球历史的大部分时间，地球46亿年历史记录的95%都保存于大陆岩石圈中。但由于经受多次叠加的热作用和变形过程使得它的演化历史难于解开。因而它就成了对当代地球科学的一个挑战，所以国际岩石圈计划也就把研究大陆及其边缘作为重点，以填补地球科学上的这一空白。当然其重要性还在于地球的这一部分，实际上提供给我们几乎全部矿产和能源资源和人类生存的空间。

这个计划自1981年正式实施5年已到中期，1985年对前五年的工作进行了总结，出版

了十二卷论文集,展示各方面的研究成果。并且在组织上进行调整。调整后的工作组包括:1) 现今板块运动和变形;2) 大陆岩石圈的性质和演化(包括A. 活动带的性质和演化中的变化, B. 地质历史过程中板块运动和造山作用; C. 大陆岩石圈的热力学、化学和岩浆的演化);3) 板内现象;4) 大洋岩石圈的性质和演化;5) 大洋和大气的古环境演化;6) 岩石圈—软流圈系统的构造、物理性质、成分和动力学;六个协调委员会是:1) 环境地质和地球物理;2) 矿产和能源资源;3) 发展中国家的地球科学;4) 大陆深钻;5) 数据中心与数据交换;6) 国家代表(包括:A. 喜马拉雅地区; B. 北极地区; C. 安第斯地区等分委员会);7) 全球地学断面。

正当国际岩石圈计划成功地进展时,1986年9月国科联(ICSU)21次大会讨论决定,这个计划不再于80年代末结束,而是将继续执行下去,每五年检阅一次。这一决定反映了岩石圈研究的重要意义和地球科学对面临新的挑战所作出的战略决策。

二、地球科学的进展与岩石圈计划的重要目标

近年来,由于上述一系列国际岩石圈计划的执行,使地球科学获得迅速发展,有许多新的突破,不断变革更新。

岩石圈计划虽然是基础研究,但它以服务于寻找资源和减轻灾害为目的。近年来随着人们对地球未来资源和减轻自然及人为灾害的日益关心,新技术的进步和广泛应用已经取得了多方面的基础资料 and 实际效益。

以板块构造为主体的全球构造学说的出现,使人们的地球观发生了重大改变。过去准静态的地球模式已被抛弃,代之以高度活动的动力地球观。由地球内部热驱动着对流,在地球表面则表现为相对运动着的岩石圈大块体。它们之间的相对运动虽然每年仅有几厘米的速度,但在数百万年地质历史的过程中将会产生非常显著的效应,地震、火山作用和构造变形等都与之有密切关系。

当前空间技术应用于观测地表已达到厘米级的精度。这种可能性使大地测量和构造学发生了革命性变化。应用包括卫星定位、甚长基线测量、航天遥感等技术方法,现在已能直接测量板块运动和大陆漂移的速度,观测在板块或块体边缘的应变积累和释放的过程。这就使得研究岩石圈的运动与变形这一岩石圈动力学的主要领域出现了重大的飞跃。

现在人类已经进入空间探测的时代,应用强大的望远镜和各种卫星、飞行器、空间站开辟了一门新的科学——比较行星学。同时也用各种潜水设备,配合地球物理等手段深入地探测海底,可以说上天与下海都取得了很大进展。然而,对与地球的成因、演化和组成等有关的基本问题还远未解决,这是由于我们对地球内部的无知。俗话说“上天容易入地难”,在今天仍然具有现实意义。人们用地震方法、钻探等手段对地壳进行的探测研究正在顺利地进展,但是,对地壳以下的地幔和地核的认识还很模糊。板块构造学说使地球科学发生了革命性变化,但人们仍然不了解其驱动机制,也不清楚为什么全球过程随时间而发生变化。而许多地质、地球物理现象如成矿作用、火山、地震和造山作用,乃至地磁场的形成等,都与地球深处所发生的各种过程密切联系着。因此深部探测就成了地球科学最严峻的挑战。而现代科学的发展,已使多学科联合向地球深处进军有了可能。

第二次世界大战以后有大量的新的仪器设备和技术方法,应用于海洋的探测研究,导致板块构造学说的形成。现今地球科学的发展则转向大陆和深部探测,并开拓了地球内部

的多维研究。这不仅包含着板块在空间和时间上的四维运动，而且也包括物理和地球化学性的变化。近年来已经进行的国际多学科深部探测计划是多方面的。例如：为了提高地球物理探测技术的分辨能力和对深部构造的研究程度，美国首先发展了大陆地壳反射地震剖面法，并且建立了以COCORP为代表的合作计划，开展大陆地壳的地震反射剖面法探测。

其他国家也相继建立了类似COCORP的计划，取得了令人瞩目的成果。

西欧各国以及美国、加拿大、墨西哥三国合作，分别在欧洲和北美等地区进行了从大陆到海洋的地学断面计划，编制包括地质构造、岩石组合以及现有深部地球物理探测资料的综合地壳断面，目前北美已经完成了二十三条。它在解释岩石圈的结构构造、形成演化及其与深部特征之间的联系方面，取得了显著的成绩。现在，国际岩石圈计划决定组织“全球地球科学断面计划”，(Global Geoscience Transect, 简称GGT) 由世界各国广泛协作，将完成200条这样的断面。在现有资料的基础上，全面加深对大陆岩石圈的认识和了解。

此外，在长距离剖面上用地震波折射方法探测地幔，以及对软流圈电导性研究的国际计划，对于地幔岩石的化学和物理性质及其岩石成因和构造意义的研究等方面，都进行了许多有意义的工作。

为了验证地壳深部地球物理的探测结果，苏联在科拉半岛打了第一口旨在穿透地壳的深钻，已经钻进了12km多。对取出的岩芯实物进行鉴定获得了许多出乎预料的结果。使经典的根据地球物理资料确定的康拉德界面的含义，发生了根本的改变。过去把下地壳中的高速层认为是玄武岩层，而现在则可以肯定它至少包含着局部的长石-石英质岩层。尽管在人类征服宇宙空间已经成为现实的今天，对地球深处的直接观察哪怕是增加1km，还仍然要付出极大的代价。目前，美国、西德等工业技术比较先进的国家，正在计划投入大量的物力和财力，应用最先进的科学技术开展深钻计划。可以预料，这一工作的进行，必将把过去有关大陆深部结构、构造和物质成分的老观念完全刷新。

当代固体地球物理和技术方面的重大突破，是应用地震波层析技术(Seismic Tomography)去研究深部地球的多向量模式。震波层析技术第一次得到了地幔的三维构造格式，可以作为了解地幔对流的一个窗口。地球科学的一个新的前沿，就是对地幔中这些层析成像特征的性质和演化进行分析研究，取得深入的理解。还有层析的地幔非均匀性与大地水准面起伏的关系，与岩浆岩地球化学的关系的研究等等。

地球化学和同位素分析技术的迅速发展及广泛应用，开辟了对岩石圈动力学和演化地球化学以及地质年代学研究的新前景。从地球内部到地表之间通过板块俯冲、造山作用、岩浆活动等方式发生的物质相互转化和变化的联系中，建立起全球过程的三维地球化学模式。对于揭示地球深部的物质状态和运动方式，以及提供深部地球动力学过程的信息，都具有极其重要的意义。

值得一提的是古海洋学的发展，它研究地球上海洋的古环境和地质发展历史。60年代板块构造学说的提出是海洋地质学的一个突破，现在古海洋学的进展又孕育着另外一次新的突破。此外，国际岩石圈计划的重要目标中还有大陆下地壳的综合研究以及世界应力图的编制等。

固体地球科学与其他学科之间的相互渗透和交叉，是现代科学技术发展的必然结果。最近国际“地圈-生物圈的全球变化”计划的建立，将近一步发展岩石圈、生物圈、大气

圈、水圈以及日地关系等交叉学科的作用,广泛研究影响人类生存环境的各种变化因素。使地球科学的领域从对岩石圈进行深入研究的基础上,从固体地球的科学转向与人类生存有直接关系的环境科学以及岩石圈与生物圈、大气圈、水圈等相互作用的效果方面。这无疑也将使地球科学的各个领域取得突破性进展和质的飞跃。

三、中国及邻近海域岩石圈动力学图的编制

从50年代至70年代的30年里,由于种种原因,国际上地学领域的一系列规划,如1957~1958年的国际地球物理年,60年代的国际上地幔计划,70年代的国际地球动力学计划等,我国地学工作者都未能参加,这对我国地学的发展造成了一定影响,加大了与国际地球科学水平的差距。

1978年党的十一届三中全会以来,我国实行开放政策,形势发生了巨大变化。70年代末国际岩石圈计划开始论证,从组建时起就有中国地学工作者参加。在中国科学技术协会领导下,我国也建立了岩石圈计划国家委员会。

中国是一个以大陆为主体的国家,地处欧亚板块的东南部,为印度板块及太平洋板块、菲律宾板块所夹持。既保存了大于30亿年古老而且复杂的地质记录,又充满现代构造活动的生机。地质历史中的垂直和水平运动及内部变形都非常显著,特别是晚近时期以来,形成了世界独一无二的青藏高原隆起及其边缘的挤压转换构造、西北的再生高山与压陷大盆、以华北为代表的新生代裂陷伸展、复杂而有序的板内破裂场,以及很强的大陆内部地震活动性等。尤其是在大陆内部由活动构造带和地震带所勾画出的镶嵌的活动亚板块及块体和这些块体的相对运动,都受着地壳、岩石圈非均一性、构造应力场和深部过程的控制,都须要从岩石圈动力学的基本过程加以说明。

在这种得天独厚的地质构造条件下,我国地球科学工作者理应在国际科学计划的前沿课题研究中作出应有的贡献。鉴于此,又考虑到国家地震局系统广大地学科技工作者,近20年来,在地震监测、地震地质、形变测量、深部探测和其他地球物理观测研究中,已经积累了大量实际资料,有必要加以综合整理和提高。所以在1982年初国家地震局下达了编制《中国岩石圈动力学地图集》(以下简称《图集》)的任务,作为“六五”期间的重点科研项目。《图集》以大陆岩石圈结构、新构造变动、地震为副标题,突出它的主要内容,并以此为寻找资源、保护环境和减轻地质灾害服务。这在国内外地球科学发展中也是一个首创。

《图集》是一部以资料性为主,兼有学术性的大型综合性地图集。由7个图组,计68幅图件和《1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图》^[1]所组成。它汇集了我国各有关部门30多年来所积累的地质构造、新构造变动、地震、地球物理、地球化学和大地形变测量等方面的实际资料,较系统地反映了我国岩石圈动力学的某些重要特征。

作为《图集》的一个重要组成部分,《1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图》对我国现今活动着和新生代活动过的地质和地球物理过程、岩石圈动力学特征给予综合概括。它所遵循的基本概念和编图思路,在编制该图过程中起着指导作用^[2, 3]。

(一) 有关岩石圈动力学的基本概念

板块构造学说在合理地阐明地球表层物质的运动学方面取得了明显的效果。它容纳了各种与地球内部动力学有关的假说。然而随着现代科学技术的发展,早期简单化的模式日

益受到其内部不断揭露出来的复杂现象的严峻考验,不可避免地遇到一系列新的挑战,并把一些具有战略意义的问题推到当代地球科学研究的前沿,例如对大陆及其边缘岩石圈和地球深部的研究。为了深入探索和解释岩石圈的组成及动力学有关的问题,美国地球动力学委员会于1982年在得克萨斯(Texas)大学举行了一次研讨会,会后出版了以“岩石圈”为书名的小册子(1983)[4]。会议主席J.C.马克斯韦尔(1983)还以“什么是岩石圈?”为题发表了文章。这无疑也是我们编图时需要澄清的问题。

1. “岩石圈”在地质文献中并不是一个新名词。它早已出现于上个世纪末到本世纪初的文献中,指的是地球的石质外壳,以区别于大气圈和水圈。而现代岩石圈的概念是与板块构造相联系的。它的要点是地球外部的刚性壳由能够独立地相互运动的不连续的板块组成,而这种板块的组合就构成了地球的岩石圈。然而,当前鉴别岩石圈的准则很不相同,有关岩石圈的含意至少有四种:

(1) 弹性或挠曲的岩石圈,从地表载荷调整计算得出,通常为20~30km厚。

(2) 热岩石圈,即支撑一个传导热梯度的地球的冷的外层,计算得出的厚度约为100km。

(3) 地震波的岩石圈,覆盖的范围广泛,但不一定是在全球规模的上地幔地震波低速层之上。这个层的深度在年轻大洋下不到45km,在大陆下约为150km。一般把这个低速层当作软流圈,但未必是正确的。

(4) 化学—矿物学的岩石圈,如果地幔的顶部是层状的或大体上是不均匀的话,就可推断出岩石圈与软流圈的化学的或矿物学的边界。

本图采用了地震波得出的岩石圈概念。

2. 关于“动力学”,众所周知,动力学是力学的一个分支。它研究改变或产生物体运动的力。而地球动力学是一个内涵很广泛的名词,简言之,其对象是地球内部的力和各种过程。特科特和舒伯特(1982)在其所著的“地球动力学”[5]一书中,把理解板块构造和一系列地质现象所必须的基本物理过程作为基本内容。本图所用的岩石圈动力学主要指的是岩石圈的运动与变形及其与深部过程的关系。

(二) 编图思路

本图的主要任务是汇集岩石圈现代运动和变形以及现今进行着的各种过程的信息,并表示将来会导致运动的因素。前者的要素如活动亚板块、构造块体的边界及其运动矢量;主要活动层及其滑移速率;活动裂谷;活动褶皱;年轻火山;热流;地震活动等。后者如重力、航磁异常带;地壳和岩石圈厚度;上地幔顶部纵波速度;岩石应力状态等。它们反映地壳、上地幔的应力状态和静态非均匀性,并会在将来引起动态非均匀性。简言之,本图是从岩石圈的介质、结构、应力、运动、变形和深部过程的角度综合表现我国的岩石圈动力学的。

板内应力场受控于板块相互作用的状况和岩石圈非均匀性。反之,利用板内各种地质和地球物理信息去再造板内应力场也可估计块体相互作用的状态和相对运动的速率,并进而推测造成这种运动的动力学过程。本图正是以厚度不均匀的地壳、岩石圈为基础,以大地构造分区为背景,通过活动亚板块与构造块体相对欧亚板块(西伯利亚)的整体运动及它们之间的相对运动,在板缘和板内造成的各种构造现象以及各种地球物理场去揭示第四纪以来,特别是现今的运动学过程,并推导其驱动机制。当然也会涉及到第三纪的动力学

历史。它对现今活动或新生代曾经活动过的地质和地球物理过程给予总的概括。

综上所述,《1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图》对我国现今活动着的和曾经在新生代活动过的地质和地球物理过程作了一个概括。它反映了我国广大地学工作者在中国岩石圈研究方面所做的努力和取得的进展。很明显,在中国可以找到研究岩石圈动力学的每一个领域的机会。

由于我国所处构造位置,本图以表现板内现象为重点。它不仅为研究现今的岩石圈动力学,也为进一步把这些活动过程外推到地质过去或未来,提供了一个区域性格架,并以此来寻找资源、保护环境和减轻地质灾害服务。众所周知,地质和地球物理过程和事件不是杂乱无章的堆积,而是具有密切联系,并由统一的有规律的运动过程造成的,合乎规律的整体。要正确理解某种现象或过程,就应从它与其它现象或过程的联系中去考察,去了解它的起源和发展。因此,各方面的工作都应有一个整体观,而建立各种模型也是必要的。

板块构造学说、构造系统或构造组合的整体观和解析构造学的方法,大大增强了预测和预防地质灾害、保护环境和寻找资源的能力。以减轻地震灾害为例,人们面临着正确判定未来强震活动、潜在震源区和可靠估计地震灾害的严重挑战。然而,我们目前对地震的成因还不够了解,因此必须探索新的途径,运用新的模型去了解发震的条件,例如,用块体模型或均匀弹性模型去预测应力、应变表现就有显著差别。再如,过去往往根据一条活断层的滑动速率和强震复发周期等来估计地震危险,这固然是一条较有效的途径,然而客观事物远不是这么简单。我们必须注意断层运动的多样性、破裂过程的复杂性和发震构造的组合类型等等。特别是要把单一的要害放到统一的动力学环境里去加以考察,科学地理解这种发展的全部机制,只有这样才能获得较为合理的答案。因此,对岩石圈动力学尤其是对板内动力学的理解是正确估计地质灾害的先决条件。至于能源和矿产资源的形成、富集与岩石圈动力学的密切关系更是显而易见的,例如石油、天然气与岩石圈伸展构造的密切关系等,在此不再赘述。

必须强调指出,虽然我们提供了一些有关我国岩石圈动力学的现象和过程,并给出了一定的解释,但还有许多现象未被发现、未被认识,还有许多问题没有解决,特别是对深部过程的理解更是十分肤浅。

至于编制岩石圈动力学图尚属初次,没有经验,图中和文内难免有不妥乃至错误之处,衷心地希望广大读者和地学工作者批评指正。

参 考 文 献

- [1] 马杏垣主编, 1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图, 地质出版社, 1986.
- [2] 马杏垣主编, 1:400万中国及邻近海域岩石圈动力学图说明书, 地质出版社, 1987.
- [3] 马杏垣, 1987, 地质学报, 61(1987) №3.
- [4] The Lithosphere. Report of a Workshop, National Academy Press. Washington, D. C. 1983.
- [5] Turcotte, D. L. and G. Schubert, Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley & Sons, 450 p, 1982.

4. 在深部地质探索中的实验研究

李兆薰 尚如相

(中国地质科学院地质研究所)

80年代深部地质探索的中心问题是岩石圈尤其是大陆岩石圈的组成、演化和动力学机制,而实验研究则是检验全球构造假说和正确解释地球物理信息的重要依据。深部地质有关问题的实验研究不能孤立地进行,必须在地质学和地球物理学研究的基础上,并与岩石学、地球化学和热力学等的研究相结合。

一、高温、高压的实验技术、方法的发展现状

目前,高温、高压的实验手段的发展,已经达到了可以不同程度地模拟地壳、上地幔、下地幔和地核的温度、压力条件^[1,2]。

1600℃的高温炉可以分别在真空、惰性气体或受控混合气体的条件下进行实验。液体介质的传压装置,实验的温度区间为20~1000℃,压力区间为0~10⁸Pa。气体介质传压装置,温度区间为200~1200℃,压力区间为0~12×10⁸Pa。以上高温高压设备主要用于模拟地表和地壳不同深度的温、压条件,对花岗岩浆起源,岩浆侵入和喷出、分异和同化,以及变质作用的某些物理化学过程,进行实验研究。

固体介质传压装置种类较多,有对面顶、四面顶、六面顶、二十四面顶和球面顶等。其实验的温度区间为20~1500℃,压力区间为0~45×10⁸Pa、12×10⁹Pa或更高。主要用于模拟下地壳和上地幔上部的温、压条件,研究上地幔的组成、部分熔融和玄武质、安山质岩浆起源,以及水和挥发份的影响等有关的物理化学过程,进行高温高压矿物相转变和相平衡的研究。

金刚石窗型的压力容器(MBC装置),用金刚石做压头,激光加热、激光测压,目前已经达到了超高温、超高压(3500℃和17×10¹⁰Pa)的实验条件。可用于模拟深地幔(上地幔下部、下地幔)和外地核的温、压条件,研究下地幔和地核的成分、相转变和相平衡,以及与解释地球物理信息有关的摩尔体积、电导率、弹性模数和放射性衰变率等的测定和推算,甚至还可以探索在超高压条件下矿物含水性的问题。

冲击波飞板和空气压缩的气体枪,可以获得10⁶MPa的超高压和10000℃的超高温,超过了地核实际的温度和压力(估计地核约为5000℃、4×10⁵MPa),但是这种实验条件只能维持10⁻⁶s,所以不能使实验体系达到平衡的程度,主要用于研究冲击坑岩石的冲击变质作用和斯石英、焦石英的相条件的研究。

实验技术的进步除了不同级别的压力装置配套日趋完善和实验模拟的条件从高温高压向超高温、超高压方向发展之外,另一个重要的表现是实验过程的自动化,以及样品的实验和分析的系列化。目前某些高温高压实验过程,已采取计算机程序自动控制。样品的物相分析、结构测定和化学成分的分析所需的X光衍射仪、穆斯鲍尔谱仪和光谱分析仪,经专门设计,可与MBC装置配套连用,并在实验过程中进行测定工作。